DANIEL L. SCHODEK

STRUKTUR

FUMIGASI
T. A
1999/2000

PENERBIT PT ERESCO BANDUNG 1991

10000 050 46 47

MILIK
PERPUSTAKAAN DAERAH
JAWA TIMUR

Nomor : 96.369 / IDI / P / 1995
Tanggal : 3-2-1995

Proyek Pembinaan Perpustakaan
Jawa Timur
T. A. 1994 / 1995

TK.05.01.91
Judul Asli: STRUCTURES

Hak terjemahan dalam bahasa Indonesia pada:
Penerbit PT ERESCO

STRUKTUR
Penerjemah: Ir. Bambang Suryoatmono, M.Sc.
Fakultas Teknik Jurusan Sipil
Universitas Katolik Parahyangan

Editor: Tjun Surjaman
Desain sampul: Dedy Suardi
Cetakan pertama 1991

Diterbitkan oleh PT ERESCO – Anggota IKAPI
Hak cipta dilindungi undang-undang; Tidak diperkenankan memperbanyak penerbitan ini dalam bentuk apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

DAFTAR ISI

Pendahuluan

Bagian I KONSEP–KONSEP PENDAHULUAN 1

1. Struktur: Tinjauan Singkat 3

1.1 Pendahuluan 3
1.2 Kelas-kelas Umum Struktur 6
1.2.1 Jenis utama struktur 6
1.2.2 Elemen-elemen struktur utama 10
1.2.3 Satuan struktural utama 16
1.2.4 Penggabungan (aggregations) 18
1.3 Dasar Analisis dan Desain Struktur 18
1.3.1 Pendahuluan 18
1.3.2 Kestabilan struktur 19
1.3.3 Keadaan gaya dalam tarik: tekan, dan lentur 21
1.3.4 Sistem satu arah dan dua arah 23
1.4 Susunan Struktur 24
1.4.1 Struktur sel 24
1.4.2 Optimasi desain 25
1.5 Struktur Funicular 29
1.5.1 Karakteristik dasar 29
1.5.2 Perilaku struktural 32
1.6 Klasifikasi Lain 37

2. **Prinsip-prinsip Mekanika** 41

2.1 Pendahuluan 41
2.2 Gaya dan Momen 42
2.2.1 Gaya 42
2.2.2 Besaran skalar dan vektor 43
2.2.3 Jajaran genjang gaya 45
2.2.4 Resolusi dan komposisi gaya 46
2.2.5 Momen 47
2.2.6 Sistem yang ekuivalen secara statis 48
2.3 Keseimbangan 49
2.3 Keseimbangan 49
2.3.1 Keseimbangan suatu partikel 51
2.3.2 Keseimbangan benda tegar 54
2.4 Momen dan Gaya Internal dan Eksternal 54
2.4.1 Sistem gaya eksternal 59
2.4.2 Momen, gaya, dan tegangan internal 64
2.4.3 Gese dan momen 70
2.4.4 Distribusi momen dan geser 77
2.4.5 Hubungan di antara beban, geser, dan momen pada struktur 78
2.5 Sifat Mekanis Material 78
2.5.1 Pendahuluan 78
2.5.2 Sifat beban-deformasi pada material secara umum 79
2.5.3 Elastisitas 83
2.5.4 Kekuatan 84
2.5.5 Material daktil (ductile) versus getas (brittle) 85
2.5.6 Sifat mekanis lainnya 86
2.6 Deformasi pada Batang-batang Tarik dan Tekan 92

3. **Pendahuluan untuk Analisis dan Desain** 92

3.1 Kriteria Desain dan Analisis 92
3.1.1 Kemampuan layan (serviceability) 93
3.1.2 Efisiensi 93
3.1.3 Konstruksi 94
3.1.4 Harga 94
3.1.5 Lain-lain 94
3.1.6 Berbagai kriteria 94
3.2 Beban pada Struktur 94
3.2.1 Pendahuluan 96
3.2.2 Gaya-gaya statis 100
3.2.3 Beban angin 103
3.2.4 Gaya-gaya gempa 109
3.2.5 Kombinasi pembebanan 111
3.3 Proses Analisis Umum 111
3.3.1 Langkah dasar 113
3.3.2 Pemodelan struktur 118
3.3.3 Pemodelan beban eksternal 133

Bagian II ANALISIS DAN DESAIN ELEMEN STRUKTURAL 134

4 **Rangka Batang** 134

4.1 Pendahuluan 135
4.2 Prinsip-prinsip Umum 135
4.2.1 Pembentukan segitiga (triangulasi) 136
4.2.2 Konfigurasi 137
4.2.3 Gaya batang 140
4.3 Analisis Rangka Batang 140
4.3.1 Stabilitas 143
4.3.2 Gaya batang: Umum 144
4.3.3 Keseimbangan titik kumpul 152
4.3.4 Keseimbangan potongan 159
4.3.5 Geser dan momen pada rangka batang 163
4.3.6 Rangka batang statis tak tentu 165
4.3.7 Rangka batang ruang 165
4.4 Desain Rangka batang 165
4.4.1 Latar belakang 167
4.4.2 Desain batang: umum 170
4.4.3 Penggunaan batang tarik khusus 175
4.4.4 Pengontrolan distribusi gaya pada rangka batang 177
4.4.5 Tekuk pada batang tekan: Pengaruh pada pola segitiga 178
4.4.6 Tekuk lateral batang pada rangka batang 180
4.4.7 Tekuk lateral susunan batang 182
4.4.8 Rangka batang bidang vresus rangka batang ruang 182
4.4.9 Rangka batang funicular 188
4.4.10 Lokasi tumpuan 189
4.4.11 Tinggi rangka batang 190
4.4.12 Kekakuan titik kumpul 193

5 **Struktur Funicular: Kabel dan Pelengkung** 193

5.1 Pendahuluan 193
5.1.1 Struktur funicular 193
5.1.2 Kabel 194

5.1.3 Pelengkung 196
5.2 Prinsip-prinsip umum 197
5.2.1 Bentuk funicular 197
5.2.2 Tinjauan desain khusus 199
5.3 Analisis Kabel dan Pelengkung 203
5.3.1 Pelengkung tiga sendi 203
53.2 Pelengkung funicular dan kabel: Beban terpusat . . . . . 2[illegible]
5.3.3 Pelengkung kabel dan funicular: Beban terbagi rata 216
5.3.4 Persamaan Funicular Umum 220
53.5 Panjang busur atau kabel 222
5.4 Desain Pelengkung an Kabel 222
5.4.1 Sag kabel atau tinggi pelengkung 222
5.4.2 Desain struktur kabel 223
5.4.3 Desain struktur pelengkung 227

6. Elemen Lentur: Balok Sederhana 238

6.1 Pendahuluan 238
6.2 Prinsip-prinsip Umum 239
6.1.1 Balok pada gedung 239
6.2.2 Tegangan dan deformasi pada penampang melintang 242
6.2.3 Mekanisme pemikul beban dasar 245
6.2.4 Distribusi gaya pada balok 247
6.3 Analisis Balok 248
6.3.1 Tegangan lentur 249
6.3.2 Tegangan geser 259
6.3.3 Tegangan tumpu 265
6.3.4 Torsi 266
6.3.5 Pusat geser 269
6.3.6 Tegangan gabungan 269
6.3.7 Tegangan utama 271
6.3.8 Defleksi 273
6.3.9 Perilaku plastik pada balok 276
6.3.10 Balok beton bertulang 280
6.4 Desain balok 283
6.4.1 Penentuan dimensi balok 283
6.4.2 Bentuk-bentuk penampang melintang 288
6.4.3 Tekuk lateral pada balok 290
6.4.4 Variasi material pada penampang melintang 293
6.4.5 Variasi bentuk balok di seluruh panjangnya 295
6.4.6 Variasi kondisi tumpuan dan kondisi batas 300
6.4.7 Prategang (prestressing) dan pascatarik (post-tensioning) . . 301

7 Elemen Tekan: Kolom 308

7.1 Pendahuluan 308
7.2 Prinsip-prinsip Umum 309
7.2.1 Kolom pendek 309
7.2.2 Kolom langsing 309
7.2.3 Ringkasan 313
7.3 Analisis Elemen Tekan 313
7.3.1 Kolom pendek 313
7.3.2 Kolom panjang (langsing) 316

7.4 Desain Elemen Struktur Tertekan 328
7.4.1 Tujuan desain 328
7.4.2 Kondisi ujung 328
7.4.3 Pengekang (bracing) 329
7.4.4 Kolom pada konteks gedung 332
7.4.5 Penampang melintang kolom 332
7.4.6 Ukuran kolom 334

8. Struktur Menerus: Balok 337

8.1 Pendahuluan 337
8.2 Prinsip-prinsip umum 338
8.2.1 Kekakuan 339
8.2.2 Distribusi gaya 339
8.3 Analisis Balok Statis Tak Tentu 341
8.3.1 Metode analsis pendekatan 341
8.3.2 Efek variasi kekakuan balok 345
8.3.3 Efek settlement (penurunan) tumpuan 348
8.3.4 Efek kondisi pembebanan sebagian 348
8.4 Desain Balok Statis Tak Tentu 352
8.4.1 Pendahuluan 352
8.4.2 Momen desain 352
8.4.3 Penentuan penampang balok menerus 354
8.4.4 Penggunaan titik hubung konstruksi (construction joints) 356
8.4.5 Pengontrolan distribusi momen 356
8.4.6 Balok menerus beton bertulang 358

9. Struktur Menerus: Rangka Kaku 362

9.1 Pendahuluan 362
9.2 Prinsip-prinsip Umum 362
9.2.1 Beban vertikal 363
9.2.2 Beban horizontal 365

9.3 Analisis Rangka Kaku 367
9.3.1 Metode analisis pendekatan 367
9.3.2 Pentingnya kekakuan relatif balok dan kolom 377
9.3.3 Goyangan 381
9.3.4 Turunnnya tumpuan (supportsettlement) 383
9.3.5 Efek kondisi pembebanan sebagian 383
9.4 Desain Rangka Kaku 384
9.4.1 Pendahuluan 384
9.4.2 Momen Desain 384
9.4.3 Penentuan bentuk rangka 386
9.4.4 Kondisi ujung 388
9.4.5 Tinjauan umum 391

10 Struktur Plat dan. Grid 393

10.1 Pendahuluan 393
10.2 Prinsip-prinsip Umum 394
10.2.1 Grid 394
10.2.2 Plat 397
10.3 Analisis Grid dan Plat 399
10.3.1 Struktur Grid 399
10.3.2 Struktur Plat 401
10.4 Desain Plat dan Grid 413
10.4.1 Sistem satu arah 413
10.4.2 Sistem dua arah 419
10.4.3 Desain plat beton bertulang 422

11 Struktur Membran 431

11.1 Pendahuluan 431
11.2 Prinsip-prinsip Dasar 433
11.2.1 Aksi-aksi dasar 433
11.2.2 Struktur pneumatik 433
11.2.3 Struktur tent (tenda) dan net (jaring) 436
11.3 Analisis dan Desain Struktur Pneumatik 437
11.3.1 Struktur yang ditumpu udara 437
11.3.2 Struktur yang dipompa dengan udara 442
11.3.3 Tinjauan lain 444
11.4 Analisis dan Desain Struktur Net (Jaring) dan Tent (Tenda) ... 445
11.4.1 Kelengkungan 445
11.4.2 Kondisi tumpuan 446
11.4.3 Tinjauan lain *448*

12. Struktur Cangkang 450

12.1 Pendahuluan 450
12.2 Prinsip-prinsip Umum 453
12.2.1 Aksi membran 453
12.2.2 Struktur cangkang yang mempunyai permukaan rotasi 456
12.2.3 Struktur cangkang yang mempunyai permukan translasional *458*
12.3.4 Struktur cangkang yang mempunyai permukaan teratur 459
12.3 Analisis dan Desain Cangkang Bola 459
12.3.1 Gaya-gaya meridien (membujur) 459
12.3.2 Gaya-gaya melingkar 461
12.3.3 Distribusi gaya 463
12.3.4 Gaya terpusat 464
12.3.5 Kondisi tumpuan 464
12.3.6 Tinjauan lain 468

Bagian III PRINSIP–PRINSIP DESAIN STRUKTURAL 471

13 Grid dan Pola Struktur 472

13.1 Pendahuluan 472
13.2 Pola Pengelompokan Dasar 473
13.3 Pola Struktural yang Umum 475
13.4 Manipulasi Pola 479
13.5 Stabilitas 481
13.6 Hubungan antara Struktur dengan Ruang Fungsi 483
13.7 Efek Proporsi Bentang: Bujursangkar dan Persegi Panjang, Grid 485
13.8 Pertemuan Grid Struktural 489
13.9 Implikasi Bentuk Gedung 491
13.10 Grid Tak Seragam 496
13.11 Mengakomodasikan Ruang Besar 497
13.12 Mengakomodasikan Kondisi Khusus 499
13.13 Mengubah Lokasi Tumpuan untuk Mengurangi Momen Lentur 503
13.14 Karakteristik Pembentukan Ruang 504

14. Masalah dalam Desain Struktural 508

14.1 Pendahuluan 508
14.2 Gaya-gaya Vertikal: Efek pada Desain Struktural 509
14.2.1 Jenis beban 509
14.2.2 Panjang bentang 510

14.3 Gaya Lateral: Efek pada Desain Struktur 516
14.3.1 Tinjauan dalam desain 516
14.3.2 Pengaruh pada desain elemen struktur dan titik hubung 520
14.3.3 Konstruksi bertingkat banyak 523
14.3.4 Tinjauan Desain Gempa 528

14.4 Struktural Terpusat versus Terdistribusi 541
14.5 Prinsip-prinsip Kebijaksanaan Struktural 542
14.6 Berbagai Kondisi Batas 542
14.7 Kendala Lain; Persyaratan Keamanan terhadap Kebakaran 543

15 Sistem Struktural: Pendekatan Konstruksional 545

15.1 Pendahuluan 545
15.2 Konstruksi Kayu 546
15.3 Konstruksi Beton Bertulang 552
14.4 Konstruksi Baja 557

16 Titik Hubung 565

16.1 Pendahuluan 565
16.2 Jenis-jenis Dasar Titik Hubung 565
16.3 Jenis-jenis Dasar Pehghubung 568
16.3.1 Tinjauan umum 568
16.3.2 Baut dan paku keling 570
16.3.3 Titik hubung las 575

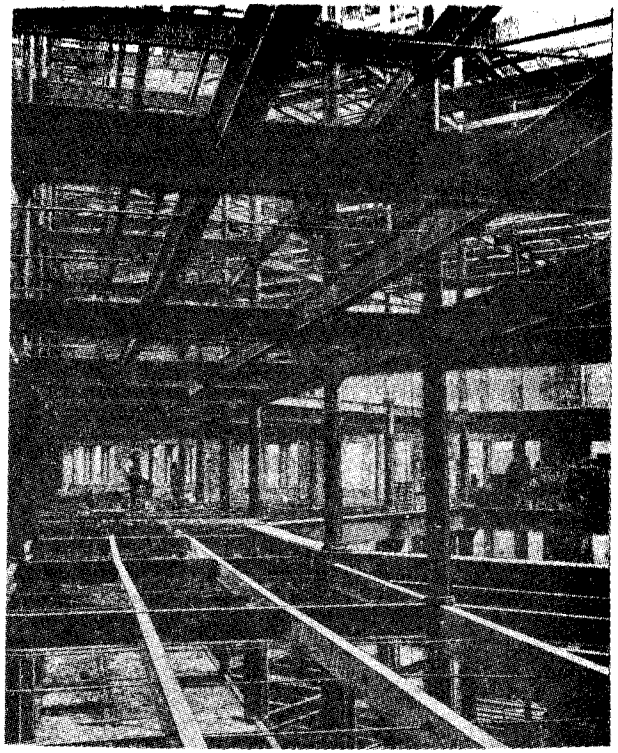
Lampiran 575

Lampiran 1 : Tabel Konversi 577
Lampiran 2 : Pusat Berat 578
Lampiran 3 : Momen Inersia 580
L.3.1 Formulasi umum 580
L3.2 Teorema sumbu sejajar 583
L.3.3 Luas negatif 584
Lampiran 4 : Tegangan Lentur pada Balok 585
Lampiran 5 : Tegangan Geser pada Balok 586
Lampiran 6 : Hubungan Momen – Kelengkungan 588
Lampiran 7 : Defleksi 590
L.7.1 Persamaan diferensial umum 590
L.7.2 Defleksi: Metode integrasi rangkap 590
Lampiran 8 : Teorema Luas Momen (Momen – Area) Kemiringan dan Defleksi 592

Lampiran 9 : Metode Integrasi Rangkap untuk Analisis Struktur Statis Tak Tentu 595
Lampiran 10 : Metode Defleksi untuk Analisis Struktur Statis Tak Tentu 597
Lampiran 11 : Metode Lain untuk Analisis Struktur 601
Lampiran 12 : Beban Tekuk Kritis pada Elemen Struktur Tekan 602
Lampiran 13 : Tabel Modulus Penampang Elastis (S_x) untuk Beberapa Bentuk Penampang yang Digunakan Sebagai Balok 604

Indeks

***



BESI DAN BAJA PADA BANGUNAN BESAR

Gambar pertama ini (Hotel Palace, Denver, Colorado) menyajikan dengan jelas bagaimana gedung yang tinggi dan besar sekarang dibangun. Pada masa lampau, dalam metode pembangunan, dengan menggunakan tiang kayu, balok, dan joist, *strukturnya yang dipikul oleh dinding sangat besar. Revolusi pelaksanaan suatu gedung dimulai pada sekitar tahun 1850. Pada hampir semua struktur pada masa lampau, dinding merupakan komponen struktur yang memikul lantai-lantai di atasnya dan memberikan kekuatan serta kestabilan pada struktur. Kebergantungan pada dinding saja lama-kelamaan dipandang sulit, apalagi gedung yang semakin tinggi, misalnya gedung empat tingkat, dapat membutuhkan tebal dinding sampai lima kaki. Bahkan pada gedung delapan atau sembilan tingkat, tebal dinding di lantai terbawah dapat terjadi hampir memenuhi seluruh ruang yang ada. Metode modern pada pembangunan gedung mengatasi hal ini sehingga arsitek dapat merencanakan dua puluh tingkat atau lebih, yang mempunyai kekuatan dan kestabilan cukup. Dinding pada struktur modern hanya berfungsi sebagai penutup gedung, tidak berfungsi sebagai tumpuan. Dengan demikian, dinding hanya perlu mampu memikul berat dirinya sehingga kebutuhan pencahayaan, yang menyebabkan dinding harus berlubang-lubang, serta kebutuhan lainnya, dapat terpenuhi. Bahkan pada dewasa ini sudah banyak terlihat gedung yang penutupnya hampir semua terdiri atas kaca* (Scientific America, *May 21, 1892).*

PRAKATA

Apabila kenyataan bahwa struktur jenis tertentu atau jenis lainnya ada pada setiap bangunan yang pernah dibuat oleh manusia kita tinjau, maka jelaslah adanya hal-hal baru dalam bentuk struktur, bahkan pendekatan struktural juga mengalami evolusi. Sistem struktur yang disebut "revolusi dalam konstruksi bangunan" dapat dilihat pada *Scientific American* edisi 1892, yang memuat perkembangan struktur. Akan tetapi, akhir-akhir ini sistem yang disebutkan dalam kutipan tadi telah dianggap tidak sesuai lagi.

Tanpa memperhatikan fakta cepatnya berubah jenis struktur yang digunakan pada suatu bangunan, ada kumpulan prinsip fisika yang didasarkan atas bidang mekanika, yang dapat digunakan oleh perancang sebagai alat bantu untuk memahami perilaku bentuk struktural yang ada dan mengembangkan pendekatan baru. Perkembangan prinsip-prinsip ini telah berjalan dengan cepat selama tiga abad terakhir, dan sebagian besar telah begitu mantap dan telah didokumentasikan. Tentu saja ada pengertian-pengertian baru yang terus-menerus terjadi, dan kita harapkan dapat selalu terjadi. Akan tetapi, alat bantu analitis masih tetap berguna bagi perancang. Hal ini benar, khususnya dalam arti perkembangan cara analitis baru tidak begitu banyak, tetapi yang banyak terjadi adalah membawa cara tersebut sebagai dasar untuk merancang dan memformulasikan solusi struktural dengan tujuan memperoleh bangunan yang lebih baik.

Buku ini membahas pendahuluan mengenai prinsip-prinsip fisis yang mendasari perilaku struktur yang mengalami pembebanan. Tujuan utama buku ini tidak saja memberikan teknik analitis, tetapi secara lebih umum menguraikan aturan dalam perancangan struktur dalam konteks gedung. Karena besarnya tujuan ini, maka buku ini tidak hanya membahas bahan-bahan yang diperlukan oleh jurusan teknik (sipil), tetapi juga oleh arsitektur. Batas kaku tradisional antarsubdisiplin dalam

teknik (yaitu statika dan kekuatan bahan) di dalam buku ini dijadikan lunak sehingga lebih terintegrasi.

Buku ini dibagi atas tiga bagian utama. Bagian I adalah pendahuluan mengenai masalah yang akan dibahas dan konsep dasar dalam analisis dan desain (perancangan). Bagian II memperkenalkan pembaca kepada hampir semua elemen struktural yang digunakan dalam gedung dan membahas cara-cara analisis dan desainnya. Setiap bab dalam buku ini dibagi atas bagian-bagian yang (1) memperkenalkan elemen yang dibahas dan menjelaskan peranannya dalam gedung, (2) membahas perilakunya terhadap beban secara kualitatif (pendekatan intuitif), (3) memeriksa perilakunya terhadap bahan secara kuantitatif, dan (4) membahas metode-metode untuk merancang (bukan saja menganalisis) elemen tersebut. Bagian III mengandung diskusi khusus mengenai logika perancangan struktural. Berbagai bab membawa pembaca dari tahapan yang sangat awal dalam perancangan (pada saat perancang baru merancang ruang-ruang fungsi dan sebagainya) hingga tahap desain yang telah sangat rinci, pada saat rincian struktur telah cukup jelas. Pada Lampiran dibahas prinsip-prinsip analisis struktural yang lebih lanjut.

Buku ini dimaksudkan sebagai sumber bacaan yang dapat dirancang sendiri oleh pemakai sesuai dengan keperluannya. Sebagai contoh, untuk yang hanya ingin mendapat pendekatan kualitatif, dapat saja dibaca Bab 1 dalam Bagian I, kemudian bagian-bagian yang berjudul "Pendahuluan" dan "Prinsip Umum" dalam setiap bab dalam Bagian II dan III. Hal ini akan memberikan tinjauan singkat kualitatif yang lebih condong kepada desain dibandingkan dengan analisis. Yang telah memiliki latar belakang aspek struktur secara analitis dapat mempelajari Bagian III yang mengandung informasi kesimpulan yang berguna dalam kaitan desain. Bagian III dapat dibaca tersendiri oleh yang memerlukannya.

Di dalam Bagian I, II, dan III banyak sekali topik analitis yang dicakup sehingga siswa (mahasiswa) atau instruktur (dosen) dapat mengintegrasikan bahannya dengan baik. Sebagai contoh, diagram geser dan diagram momen diperkenalkan secara abstrak di dalam Bab 2. Diagram ini diperkenalkan ulang dalam kaitan dengan analisis elemen struktural khusus seperti *truss* (rangka batang). Dosen dapat menyajikan pengenalan ulang ini dengan berbagai variasi. Sebagai contoh, penulis menerangkan diagram momen dan diagram geser mula-mula sebagai bagian dari analisis rangka batang, kemudian dilanjutkan dengan pembahasan yang lebih abstrak mengenai diagram momen dan diagram geser dalam Bab 2 sebelum sampai pada analisis dan desain balok. Dapat saja instruktur (dosen)lain memilih pendekatan yang berbeda. Buku ini dirancang agar mempunyai fleksibilitas yang cukup untuk dipakai dengan pendekatan yang berbeda. Sekalipun demikian bahannya disajikan dengan cara sedemikian rupa sehingga pembacaan dapat dilakukan langsung dari kulit muka sampai kulit belakang buku.

Tentu saja penulis ingin menyampaikan penghargaan kepada orang-orang yang terlibat secara langsung maupun tidak di dalam penulisan buku ini. Ide dan hasil karya penulis lain – Mario Salvadori, Robert Heller, Henry Cowan, Peter McCleary, dan Waclaw Zalewski – telah memberikan banyak pengaruh di dalam isi buku ini. Arsitek seperti Edward Baum dan Urs Gauchat, yang telah mempunyai banyak pengalaman dalam pengajaran struktur, banyak pula memberi andil dalam buku

ini. Kontribusi David Wright, Richard Rauh, Elinore Charlton, Rick Cureton, dan Denys Purcell juga sangat berharga. Kay dan Ned juga tak terlupakan, khususnya karena Ned dengan teguh beranggapan bahwa buku ini ditulis hanya untuknya. Kesabaran dan kontribusi para mahasiswa *Raduate School of Design di Harvard* juga turut memberi andil dalam bahan buku ini. Inilah buku yang dimaksud; nikmatilah.

Daniel L. Schodek
Cambridge, Massachusetts

Bagian I

KONSEP PENDAHULUAN

Tiga bab dalam Bagian I memberikan tinjauan dan pendahuluan mengenai struktur dan penggunannya di dalam gedung. Bab Pertama membahas berbagai cara mengenai klasifikasi elemen dan sistem struktural. Bab Kedua meninjau prinsip-prinsip dasar mekanika yang secara umum dapat diterapkan dalam analisis berbagai struktur. Bab Ketiga meninjau beban-beban yang terhadapnya struktur harus dirancang untuk memikul, dan secara umum membahaş analisis struktural dan proses desain dalam kaitannya dengan gedung.

Bab I

STRUKTUR TINJAUAN SINGKAT

1.1 PENDAHULUAN

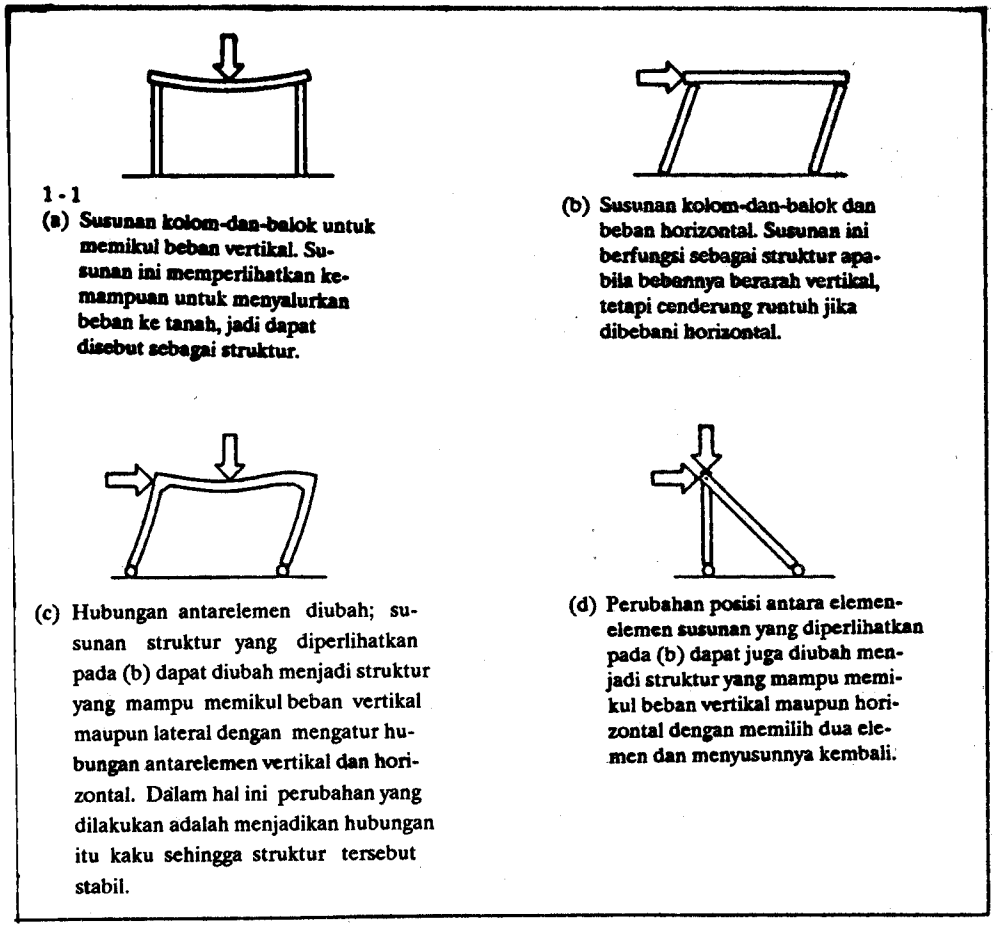
Definisi adalah cara memulai suatu buku yang sudah tradisional. Definisi yang sederhana tentang *struktur* dalam hubungannya dengan bangunan ialah bahwa struktur merupakan sarana untuk menyalurkan beban dan akibat penggunaan dan atau kehadiran bangunan ke dalam tanah. Yang penting dalam studi tentang struktur adalah banyaknya yang menjadi perhatian yang sangat bervariasi. Studi tentang struktur tentu saja menyangkut pemahaman prinsip-prinsip dasar yang menunjukkan dan menandai perilaku objek-objek fisik yang dipengaruhi oleh gaya. Secara lebih mendasar, ia bahkan menyangkut penentuan apa gaya itu sendiri karena istilah yang sangat dikenal ini menyajikan suatu konsep yang agak abstrak. Studi tentang struktur dalam hubungannya dengan bangunan juga menyangkut penanganan pokok persoalan yang jauh lebih luas tentang ruang dan ukuran. Kata-kata "ukuran", "skala", "bentuk", "proporsi", dan "morfologi" semuanya merupakan istilah yang biasa ditemukan dalam perbendaharaan kata perancang struktur.

Sebagai suatu cara untuk mulai mempelajari struktur, ada gunanya untuk memperhatikan kembali definisi pertama tentang struktur yang diberikan di atas. Meskipun berharga dalam arti bahwa ia menunjukkan maksud struktur, sayang definisi yang pertama itu tidak memberikan pengertian tentang susunan atau karakteristik struktur: *Apa* sarana yang menyalurkan beban ke dalam tanah itu? Untuk menggunakan gaya penulis kamus yang kompleks dan memastikan itu, *Struktur* dapat didefinisikan sebagai suatu entitas fisik yang memiliki sifat keseluruhan yang dapat dipahami sebagai suatu organisasi unsur-unsur pokok yang ditempatkan dalam ruang yang di dalamnya karakter keseluruhan itu mendominasi interelasi bagian-bagiannya. Tujuannya harus didefinisikan seperti di atas.

Meskipun mungkin sukar dipercaya, jenis definisi yang kacau dan agak abstrak seperti ini, yang nadanya hampir akademis secara menggelikan, sebenarnya mempunyai manfaat. Mula-mula ia menyatakan bahwa struktur adalah objek fisik yang *nyata,* bukan gagasan abstrak atau pokok persoalan yang menarik. Struktur bukanlah bahan perdebatan, melainkan sesuatu yang dibangun. Hal ini menyiratkan bahwa struktur harus ditangani sesuai dengan itu. Sekadar mendalilkan secara verbal bahwa struktur dapat memikul jenis beban tertentu atau berfungsi dengan cara tertentu, misalnya, tidak cukup. Sarana fisik harus disediakan untuk mencapai tujuan yang diinginkan yang sesuai dengan prinsip-prinsip dasar tentang perilaku objek-objek fisik. Merancang struktur seperti itu merupakan peran perancang.

Definisi yang diperluas juga menjelaskan bahwa struktur berfungsi sebagai keseluruhan. Hal ini merupakan masalah yang penting secara mendasar dan yang mudah dilupakan jika menghadapi bangunan yang khas yang tersusun dari sejumlah balok dan kolom yang seperti tak terhingga banyaknya. Dalam hal seperti itu terdapat kecenderungan yang langsung untuk menganggap struktur hanya sebagai gabungan unsur-unsur kecil sendiri-sendiri di mana setiap unsur itu melaksanakan fungsi yang terpisah. Dalam kenyataannya semua struktur adalah, dan seharusnya, pertama-tama dirancang untuk berfungsi sebagai kesatuan secara keseluruhan, dan hanya yang kedua sebagai serangkaian unsur yang berbeda-beda. Sesuai dengan bagian terakhir dari definisi yang diperluas, unsur-unsur ini tanpa kecuali ditempatkan dan diinterelasikan dengan cara tertentu agar seluruh struktur mampu berfungsi secara keseluruhan dalam memikul beban, baik yang beraksi secara vertikal maupun secara horizontal, ke dalam tanah. Dengan cara bagaimana pun beberapa unsur ditempatkan dan digabungkan satu sama lain, jika susunan resultannya dan hubungan timbal balik di antara semua unsur tidak berfungsi sebagai unit keseluruhan dalam menyalurkan semua jenis beban yang diantisipasi ke dalam tanah, maka susunan itu tidak dapat disebut struktur. Acuan kepada jenis-jenis beban yang diperkirakan dalam pernyataan yang lalu disertakan untuk menampilkan pentingnya kenyataan bahwa struktur itu biasanya dirancang terhadap sekumpulan kondisi beban tertentu dan hanya berfungsi sebagai struktur terhadap kondisi-kondisi ini. Struktur itu sering kali rapuh terhadap kondisi-kondisi yang tidak diantisipasi. Gedung yang khas yang memiliki struktur yang mampu memikul penghuni dan beban-beban lingkungannya yang normal, misalnya, tidak dapat begitu saja diangkat sudutnya dan dipindahkan melalui udara. Gedung itu akan segera berantakan karena strukturnya tidak dirancang untuk memikul beban yang tidak biasa itu.

Sementara membahas definisi-definisi yang formal, pekerjaan merancang struktur dapat didefinisikan dalam bahasa yang sekurang-kurangnya sama rumitnya dengan yang digunakan lebih dulu untuk mendefinisikan struktur, tetapi hasilnya juga mempunyai suatu nilai. Merancang struktur adalah tindakan menempatkan unsur-unsur pokok dan merumuskan hubungan-hubungan timbal baliknya dengan tujuan menanamkan karakter yang diinginkan pada entitas struktur sebagai resultannya. Gagasan bahwa unsur-unsur itu ditempatkan dan bahwa hubungan-hubungan itu ada di antara unsur-unsur itu, merupakan dasar konsep merancang struktur. Sebagai contoh, Gambar 1-1(a) melukiskan struktur sederhana dengan kolom-kolom dan sebuah balok yang ditempatkan untuk memikul beban vertikal.



GAMBAR 1-1 Struktur dasar: Penempatan atau hubungan bagian-bagian batang yang terpenting

Balok itu hanya bertumpu di atas kolom tanpa ikatan yang kaku (jenis hubungan ini menunjukkan jenis hubungan tertentu di antara dua batang). Jika pemasangan yang sama tiba-tiba harus memikul beban lateral, seperti yang bisa terjadi karena angin yang bertiup ke samping bangunan, maka pasangan ini tidak akan berfungsi lagi sebagai struktur dalam arti tidak dapat menyalurkan beban ke dalam tanah. Ia akan ambruk seperti yang dilukiskan dalam Gambar 1-1(b). Dipandang dari sudut perancangan, kesulitan yang dialami oleh pemasangan ini ialah unsur-unsur yang digunakan tidak dipasang dengan tepat, tidak dihubungkan dengan tepat, atau kedua-duanya. Pemasangan ini dapat dirancang kembali menjadi struktur yang tangguh terhadap beban lateral dengan mengubah hubungan-hubungan yang ada di antara unsur-unsurnya dan atau dengan mengubah penempatannya. Contoh mengubah hubungan-hubungan yang ada di antara unsur-unsurnya bisa berupa

penggunaan hubungan yang kaku alih-alih hubungan yang sederhana di antara unsur-unsur itu [lihat Gambar 1-1(c)]. Sambungan yang kaku pada hakikatnya berperilaku seperti kesatuan yang monolitik. Maka pemasangan itu memperoleh stabilitas dengan cara yang sangat mirip dengan cara meja memperoleh stabilitas dari hubungan yang kaku yang terdapat di antara daun meja dan kaki-kakinya. Kemungkinan yang lain ialah unsur-unsur pemasangan itu diubah penempatannya dengan cara yang diperlihatkan dalam Gambar 1-1(d), yaitu salah satu unsurnya berfungsi sebagai penopang yang memindahkan beban lateral itu ke dalam tanah.

Banyak cara yang dapat menempatkan unsur-unsur itu untuk memikul beban. Demikian pula banyak jenis hubungan yang bisa ada. Di antara cara-cara yang dapat menempatkan dan menghubungkan unsur-unsur pokok ini banyak yang akan diteliti dalam buku ini. Sifat fisik unsur-unsur pokok struktur juga penting karena sifat-sifat ini mempengaruhi sifat-sifat seluruh struktur. Sifat banyak unsur itu juga akan diteliti dalam buku ini.

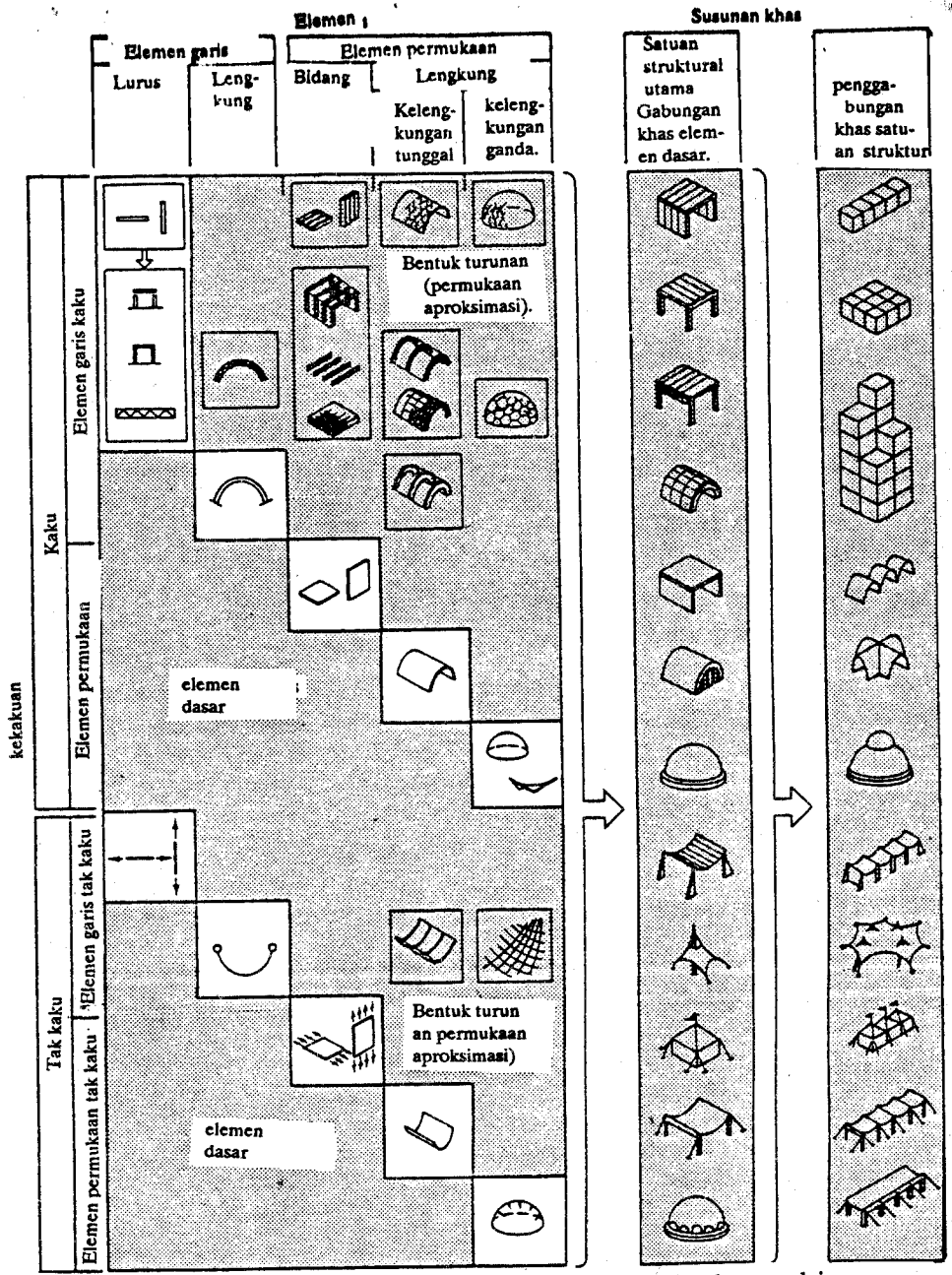
1.2 KELAS-KELAS UMUM STRUKTUR

1.2.1 Jenis Utama Struktur

Klasifikasi. Dasar untuk memahami suatu bidang ilmu adalah pengetahuan mengenai bagaimana kelompok-kelompok di dalam bidang tersebut secara sistematis dibedakan, diurutkan, dan dinamakan. Pengetahuan mengenai kriteria atau perkiraan pertalian yang membentuk dasar untuk mengklasifikasikan jenis ini juga sangat penting. Pada bagian ini diperkenalkan satu metode umum untuk mengklasifikasi elemen struktur dan sistem, yang hanya menurut bentuk dan sifat fisik dasar dari suatu konstruksi (lihat Gambar 1-2). Dari pola klasifikasi ini dapat dinyatakan secara tidak langsung bahwa struktur yang kompleks hanya merupakan hasil dari penambahan elemen yang lebih sederhana. Yang penting dari penambahan tersebut adalah penambahan perilaku elemen. Yang penting pada struktur adalah bahwa elemen-elemen itu ditempatkan dan saling berhubungan dengan maksud supaya struktur mempunyai sifat dapat menahan beban tertentu. Namun pendekatan pengklasifikasian yang lebih sederhana yang dilukiskan dengan Gambar 1-2 berguna sebagai pendahuluan.

Seperti ditunjukkan oleh Gambar 1-2, bentuk geometri secara umum dari suatu struktur tertentu adalah bentuk geometris dasar yang digambarkan pada bagian sebelah kiri dari gambar, atau berasal dari beberapa kombinasi atau kesatuan dari beberapa bentuk ini. Sesuai dengan bentuk-bentuk dasar ini adalah sekumpulan elemen struktur primer yang memiliki sifat fisik tertentu. Diskusi ini dikhususkan pada elemen-elemen tersebut.

Geometri. Berdasarkan geometri dasar, bentuk struktur yang ditunjukkan dalam gambar sebelah kiri pada Gambar 1-2 dapat secara umum diklasifikasikan sebagai salah satu *bentuk elemen garis* (atau gabungan beberapa elemen garis) atau sebagai *bentuk elemen permukaan.* Bentuk elemen garis dapat dibedakan sebagai garis lurus



[a]Gabungan ini hanya merupakan contoh, karena banyak sekali gabungan lain yang mungkin.

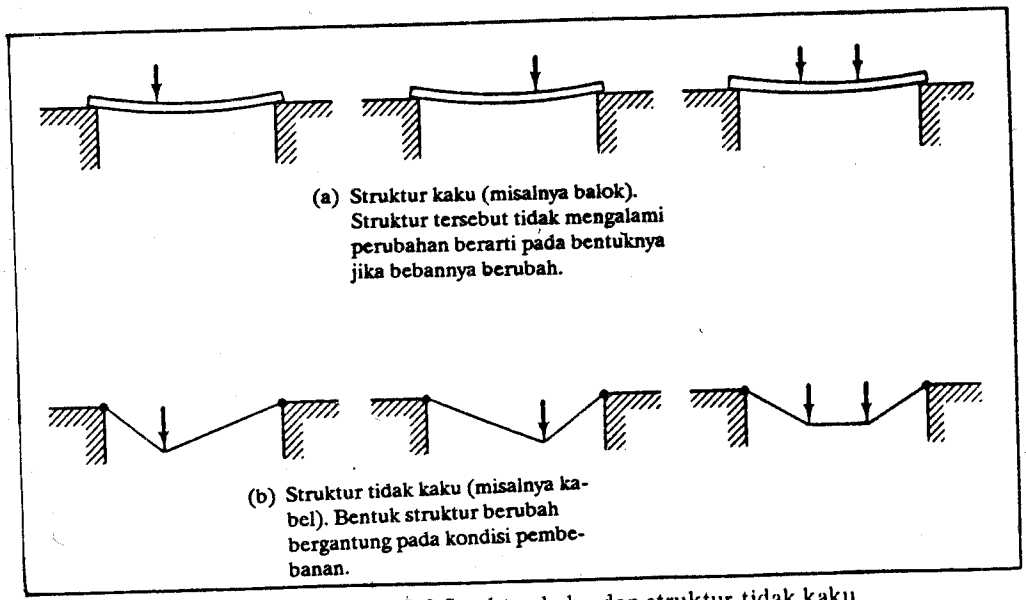
GAMBAR 1-2 Klasifikasi dari elemen struktur dasar menunjukkan geometris dan sifat-sifat fisik yang utama. Kelompok struktur utama yang khusus dan kesatuan struktur yang lain juga digambarkan.

atau garis lengkung. Bentuk elemen-elemen permukaan bisa berbentuk datar atau lengkung. Elemen permukaan lengkung bisa berupa lengkung tunggal atau lengkung ganda.

Sebenarnya, sudah tentu tidak ada elemen garis atau elemen permukaan karena elemen-elemen struktur selalu memiliki ketebalan. Untuk kegunaan pengklasifikasian, bagaimanapun selalu berguna untuk mengelompokkan elemen yang langsing (misalnya sebagai kolom yang potongan melintangnya lebih kecil daripada ukuran panjangnya) ke dalam elemen garis. Demikian halnya dengan elemen permukaan juga memiliki ketebalan, tetapi ketebalan ini juga kecil dibandingkan dengan ukuran memanjang. Istilah "garis" dan "permukaan" hanya berguna untuk memudahkan.

Apakah suatu elemen disebut berbentuk garis atau permukaan juga bergantung pada bahan dan atau metode konstruksi. Banyak bahan yang secara alami sudah berbentuk garis. Kayu, misalnya, sudah mempunyai sifat garis karena kayu memang tumbuhnya sudah begitu. Bagaimanapun juga, kita dapat membuat elemen berbentuk permukaan dari kayu (contohnya *plywood*). Bahan-bahan lain, misalnya beton, bisa juga dibuat bentuk garis atau bentuk permukaan dengan mudah. baja yang pada dasarnya sudah berbentuk garis dapat juga dibuat elemen-elemen bentuk permukaan (contoh: lantai baja).

Kekakuan. Gambar 1-2 juga melukiskan pengklasifikasian dasar kedua berdasarkan karakteristik kekakuan elemen struktur. Perbedaan yang utama di sini adalah apakah elemen itu kaku atau fleksibel. *Elemen kaku* biasanya sebagai batang, tidak mengalami perubahan bentuk yang cukup besar di bawah pengaruh gaya atau pada perubahan gaya yang diakibatkan oleh beban-beban [lihat Gambar 1-3(a)]. Struktur ini semua, bagaimanapun juga, selalu melendut, sekalipun kecil, apabila dibebani.



(a) Struktur kaku (misalnya balok). Struktur tersebut tidak mengalami perubahan berarti pada bentuknya jika bebannya berubah.

(b) Struktur tidak kaku (misalnya kabel). Bentuk struktur berubah bergantung pada kondisi pembebanan.

GAMBAR 1.3 Struktur kaku dan struktur tidak kaku.

Elemen tidak kaku atau *fleksibel*, misalnya kabel, cenderung mempunyai bentuk tertentu untuk suatu kondisi beban, dan bentuk tersebut bisa berubah secara drastis apabila pembebanan berubah [lihat Gambar 1-3(b)]. Struktur fleksibel mempertahankan keutuhan fisiknya meskipun bentuknya berubah-ubah.

Untuk kedua jenis struktur tersebut, akibat yang umum dari pembebanan adalah deformasi yang terjadi pada struktur. Umumnya deformasi yang terjadi bisa memanjang atau memendek. Pada struktur fleksibel, yang terjadi hanyalah gaya tarik sehingga deformasinya selalu berupa perpanjangan. Apabila kita meninjau struktur kaku yang melendut, keadaan memanjang dan memendek itu dapat terjadi pada potongan melintang yang sama dari elemen tersebut. Hal terakhir ini akan semakin jelas pada sebagian besar pembahasan buku ini.

Apakah elemen tersebut kaku atau fleksibel bergantung juga pada bahan konstruksi yang digunakan pada elemen tersebut. Banyak bahan, seperti kayu, sudah bersifat kaku. Bahan lain, seperti baja, bisa digunakan untuk membuat batang kaku atau fleksibel. Contoh yang baik dari bahan baja kaku adalah balok. (elemen struktur ini tidak mengalami perubahan besar dalam bentuknya bila beban berubah-ubah). Kabel baja atau rantai baja, yang bersifat fleksibel, selalu mempunyai bentuk yang bergantung pada pembebanan. Kabel baja akan berubah bentuk jika pembebanan berubah. Apakah struktur itu kaku atau fleksibel bergantung pada karakteristik bahan yang ada dan juga pada mikro susunan bahan pada elemen tersebut.

Banyak struktur yang biasanya diklasifikasikan sebagai struktur kaku, tetapi sesungguhnya struktur tersebut bisa kaku hanya dengan beberapa kondisi pembebanan atau dengan variasi kondisi pembebanan yang tidak terlalu berpengaruh terhadap struktur tersebut. Ketika pembebanan berubah secara drastis, struktur dengan tipe ini akan menjadi tidak stabil dan roboh. Struktur yang dibuat dengan menyatukan elemen kaku yang kecil (contoh: bata) menjadi suatu bentuk yang besar, biasanya termasuk ke dalam kategori ini. Kekakuan struktur jenis ini akan dibahas lebih mendalam pada bagian yang membahas mengenai pelengkung.

Material. Biasanya pendekatan yang mudah dalam mengklasifikasikan struktur adalah berdasarkan jenis bahannya (misalnya kayu, baja, atau struktur beton bertulang). Pengklasifikasian yang tepat berdasarkan bahan, bagaimanapun, agak menyesatkan karena suatu elemen bisa terdiri atas bahan-bahan yang berbeda (misalnya kayu dan batang baja). Hal ini tidak berubah, perbedaan yang sesungguhnya hanya pada tampaknya. Gambaran yang lebih umum, seperti elemen kaku dan tidak kaku, pada tahap ini lebih merupakan nilai intrinsik.

Namun bila kita meninjau struktur secara lebih rinci, pentingnya bahan akan semakin terasa. Alasan untuk ini adalah adanya hubungan yang erat antara penyebab struktur berdeformasi (sebagai akibat dari beban luar), material, serta metode konstruksi pada struktur. Baja bisa digunakan pada semua kondisi nyata. Beton tidak bertulang hanya bisa digunakan pada situasi di mana struktur hanya mendapat gaya tekan apabila dibebani. Beton akan retak dan pecah apabila suatu sistem beban menyebabkan bahan itu memanjang. Dengan demikian bahan (dan juga struktur) itu kaku hanya pada suatu kondisi beban tertentu. Beton bertulang dengan baja, bagaimanapun, dapat digunakan pada situasi di mana suatu gaya menyebabkan

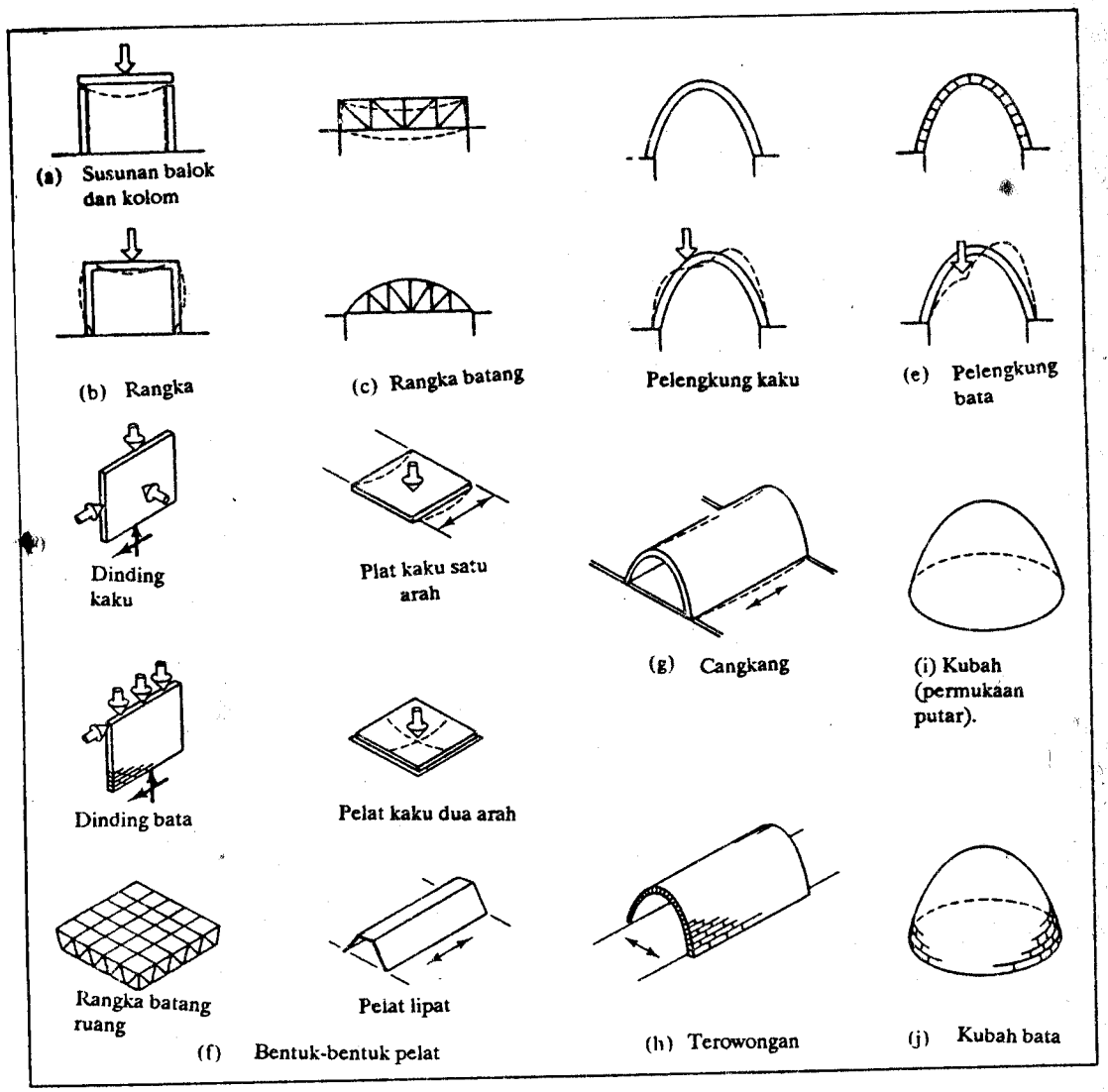
bahan tersebut memanjang karena baja tersebut bisa dirancang untuk memikul gaya tersebut. Hal ini dan pembahasan rinci lainnya akan dipelajari secara lebih mendalam pada bagian selanjutnya dalam buku ini.

1.2.2 Elemen-elemen Struktur Utama

Nama-nama Elemen. Elemen kaku yang umum digunakan, termasuk balok, kolom, pelengkung, *flat-plate*, plat berkelengkungan tunggal, dan cangkang, mempunyai kelengkungan yang berbeda-beda. Yang termasuk elemen tidak kaku, atau fleksibel, adalah kabel, membran (bidang, berkelengkungan tunggal maupun ganda). Selain itu, ada jenis-jenis elemen lain yang diturunkan dari elemen-elemen tersebut, misalnya rangka (frame), rangka batang, kubah, dan jaring. Pemberian nama pada suatu elemen yang mempunyai karakteristik kekakuan dan geometri tertentu dilakukan hanya untuk memudahkan dan merupakan tradisi saja. sekalipun demikian, penamaan elemen dengan cara tersebut kadang kala tidak berguna karena, apabila dua elemen yang berbeda digabungkan, apakah benar cara memikul bebannya akan berubah pula. Hal ini tidak selalu demikian. Karena itulah salah satu prinsip dasar mengenai struktur-struktur yang akan dibahas secara mendalam di dalam buku ini adalah bahwa dasar mekanisme memikul-beban untuk semua struktur itu sama. Sekalipun demikian, akan berguna kalau kita masih menggunakan penamaan secara tradisional tersebut agar dapat mengenalnya lebih cepat.

Balok dan Kolom. Struktur yang dibentuk dengan cara meletakkan elemen kaku horizontal di atas elemen kaku vertikal adalah struktur yang umum dijumpai. Elemen horizontal (balok) memikul beban yang bekerja secara transversal dari panjangnya dan mentransfer beban tersebut ke kolom vertikal yang menumpunya. *Kolom* tersebut dibebani secara aksial oleh balok, kemudian mentransfer itu beban ke tanah. Karena balok melentur sebagai akibat dari beban yang bekerja secara transversal tersebut, maka balok sering disebut memikul beban secara *melentur*. Ide mengenai lentur pada elemen struktural adalah salah satu yang terpenting, dan akan dijelaskan secara lebih rinci pada bagian lain buku ini. Kolom yang menumpu balok tidak melentur ataupun melendut karena kolom pada umumnya mengalami gaya aksial tekan saja. Pada gedung, panjang absolut setiap balok dan kolom yang dapat digunakan lebih terbatas dibandingkan dengan elemen struktural lainnya, misalnya kabel. Balok tunggal di atas tumpuan sederhana akan dibahas secara rinci pada Bab 6, dan kolom pada Bab 7. Balok menerus, yang ditumpu oleh banyak perletakan, akan dibahas pada Bab 8. Balok menerus pada umumnya merupakan besaran struktur yang lebih menguntungkan dibandingkan dengan balok tunggal di atas dua tumpuan sederhana.

Rangka. Jenis rangka yang akhir-akhir ini digunakan, seperti terlihat pada Gambar 1-4(b), sepintas lalu sama saja dengan jenis balok-tiang (post-and-beam), tetapi sebenarnya mempunyai aksi struktural berbeda karena adanya titik hubung kaku antara elemen vertikal dan elemen horizontal. Kekakuan titik hubung ini memberikan banyak kestabilan terhadap gaya lateral. Sebagaimana telah dibahas, kekakuan titik simpul demikian adalah salah satu dari berbagai jenis hubungan yang ada di antara berbagai elemen struktur. Pada sistem rangka, baik balok maupun kolom akan melentur sebagai akibat adanya aksi beban pada struktur [lihat Gambar 1-4(b)]. Seperti pada struktur *post-and-beam*, panjang setiap elemen pada struktur rangka juga terbatas. Dengan demikian, elemen struktur pada sistem rangka biasanya dibuat dengan pola berulang apabila dipakai pada gedung. Bab 9 membahas rangka secara lebih rinci.



GAMBAR 1.4 Struktur kaku yang umum.

Rangka Batang. Rangka batang (trusses) adalah struktur yang dibuat dengan menyusun batang yang relatif pendek dan lurus menjadi pola-pola segitiga, seperti terlihat pada Gambar 1-4(c). Struktur demikian secara eksak memang kaku karena setiap elemen garis pada struktur tersebut mempunyai posisi relatif tertentu. Berbagai pola lain (misalnya pola bujursangkar) tidak memberikan struktur kaku (kecuali apabila titik hubungnya dirancang hingga seperti pada struktur rangka). Penentuan pola akan dibahas secara lebih rinci dalam Bab 4. Perlu dicatat bahwa rangka batang yang terdiri atas elemen-elemen diskrit melendut secara keseluruhan apabila dibebani dengan cara serupa dengan balok yang dibebani transversal. Akan tetapi, setiap batang tidak melentur karena hanya mengalami gaya tarik atau tekan. Aksi internal pada rangka batang akan dijelaskan pada Bab 4.

Pelengkung. Pelengkung adalah struktur yang dibentuk oleh elemen garis yang melengkung dan membentang di antara dua titik. Struktur ini umumnya terdiri atas potongan-potongan kecil yang mempertahankan posisinya akibat adanya tekanan sebagai akibat dari beban. Bentuk lengkung dan perilaku beban adalah hal yang menentukan, apakah susunan tersebut stabil atau tidak. Apabila bentuk itu dipernyata hanya berfungsi dan stabil apabila dibebani gaya-gaya pada bidang, yang menyebabkan struktur tersebut mempunyai gaya tekan merata. Struktur demikian tidak dapat memikul beban yang menimbulkan perpanjangan atau lenturan karena tumpukan bata tersebut akan mudah berantakan. Sekalipun demikian, struktur bata bata dapat sangat kuat apabila digunakan dengan cara yang benar. Kekuatan struktur ini sangat ditentukan oleh *penempatan* tiap-tiap elemen karena bata memang dapat dengan mudah diletakkan di atas yang lainnya, atau dengan menggunakan adukan semen (tetapi adukan tersebut tidak banyak menambah kekuatan struktur). Pada akhirnya, penempatan tersebut bergantung pada jenis beban yang akan bekerja padanya. Sebagai contoh, bentuk pelengkung yang dibuat dari bata tidak dapat berupa lengkungan sembarang, tetapi harus khusus untuk beban yang direncanakan akan bekerja padanya. Struktur demikian tentu saja hanya kaku untuk kondisi yang sangat khusus. Hal ini akan dibahas lebih rinci pada Bab 5.

Yang jarang diperhatikan, namun cukup sering digunakan dalam bangunan-bangunan modern, adalah suatu bentuk struktur yang dinamakan *rigid arch* (pelengkung kaku). Bentuknya hampir sama dengan pelengkung bata, tetapi terbuat dari material kaku yang dibentuk lengkung [Gambar 1-4(d)]. Apabila bentuk lengkung yang bersifat kaku ini dibuat dengan baik, maka struktur semacam ini dapat memikul beban aksial tanpa terjadi lendutan atau bengkokan pada elemen strukturnya. Seperti akan dibahas selanjutnya, ini adalah salah satu cara yang efisien yang menguntungkan untuk memikul suatu beban. Bentuk pelengkung kaku ini lebih baik kemampuannya dalam memikul beban yang bervariasi dibandingkan dengan pelengkung bata yang terbuat dari tumpukan bagian kecil-kecil. Bentuk struktur ini akan dibahas lebih jelas pada Bab 5.

Flat Plate. (plat datar). Plat datar adalah suatu bentuk struktur yang berbentuk permukaan bidang yang dapat melendut apabila mengalami pembebanan tertentu. Jenis ini dapat digunakan dalam berbagai posisi secara horizontal, vertikal, atau pada suatu kemiringan. Salah satu penerapan dari yang horizontal adalah lantai. Plat horizontal ini menerima beban secara transversal pada permukaannya dan mentransfernya secara horizontal kepada tumpuan plat tersebut. Jika digunakan secara vertikal, elemen struktur ini biasanya memikul beban pada bidangnya. Perilaku bentuk permukaan tersebut membuat elemen plat datar sangat berguna dalam situasi di mana diinginkan permukaan penutup suatu bangunan.

Plat dapat dibuat dengan berbagai cara. Salah satunya adalah dengan membuatnya dari beton bertulang. Permukaan vertikal yang dirancang untuk memikul beban vertikal dapat dibuat dengan tumpukan bata (bentuk seperti ini disebut *load bearing wall*). Bentuk struktur seperti ini hanya dapat memikul beban pada-bidang yang arah kerjanya juga vertikal. Jadi, plat semacam ini tidak dirancang untuk mengalami lendutan pada permukaannya akibat beban eksternal.

Plat horizontal dapat juga dibuat dengan pola susunan elemen garis yang kaku dan pendek. Skema segitiga tiga dimensi digunakan untuk memperoleh kekakuan pada struktur yang tersusun tersebut. Bentuk struktur ini akan dibahas lebih lanjut pada Bab 10.

Plat kaku, sempit, panjang dapat pula digabungkan di sepanjang tepi panjangnya dan digunakan dengan bentang horizontal, serupa dengan balok-balok. Struktur ini, yang disebut *folded plate* (plat lipat), mempunyai potensi untuk membentang cukup jauh. Gambar 1-4(f) mengilustrasikan struktur plat-lipat. Plat-lipat akan dibahas secara lebih rinci pada Bab 10.

Cangkang Silindris dan Vaults. Cangkang silindris dan *vaults* adalah contoh-contoh struktur *plat-satu-kelengkungan* [lihat Gambar 1-4(g)]. Cangkang demikian mempunyai bentang longitudinal dan lengkungannya tegaklurus terhadap diameter bentang. Jika cukup panjang, cangkang akan berperilaku seperti balok yang penampang melintangnya lengkungan. Cangkang demikian selalu dibuat dari material kaku (misalnya beton bertulang atau baja). *Sebaliknya, vault* dapat dipandang sebagai pelengkung menerus. *Vaults* biasanya dibuat dengan cara yang sama dengan pelengkung bata, begitu pula fungsinya.

Kubah dan Cangkang Bola. Pada dewasa ini banyak macam permukaan-berkelengkungan-ganda digunakan. Termasuk ke dalamnya bentuk permukaan terpilin (misalnya hiperbolik-paraboloid). Banyaknya bentuk yang mungkin tidak terbatas. Mungkin permukaan-berkelengkunganan-ganda yang paling umum digunakan adalah cangkang bola (atau cangkang belahan bola) yang terbuat dari beton bertulang (suatu material kaku). Akan memudahkan kalau kita memandangnya sebagai lengkungan yang diputar. Akan tetapi, kadang kala hal ini tidak tepat. Khususnya bila mengingat fakta bahwa beban yang mungkin bekerja pada struktur tersebut mencakup juga yang berarah melingkar (pada cangkang bola), yang tidak terdapat pada pelengkung. Perbedaan nyata akan dibahas lebih lanjut pada Bab 12. Struktur kubah dapat pula dibuat dari tumpukan bata sebagai alternatif dari material kaku seperti beton. Cangkang dan kubah adalah struktur yang sangat efisien untuk digunakan pada bentang besar, dengan menggunakan material yang relatif sedikit.

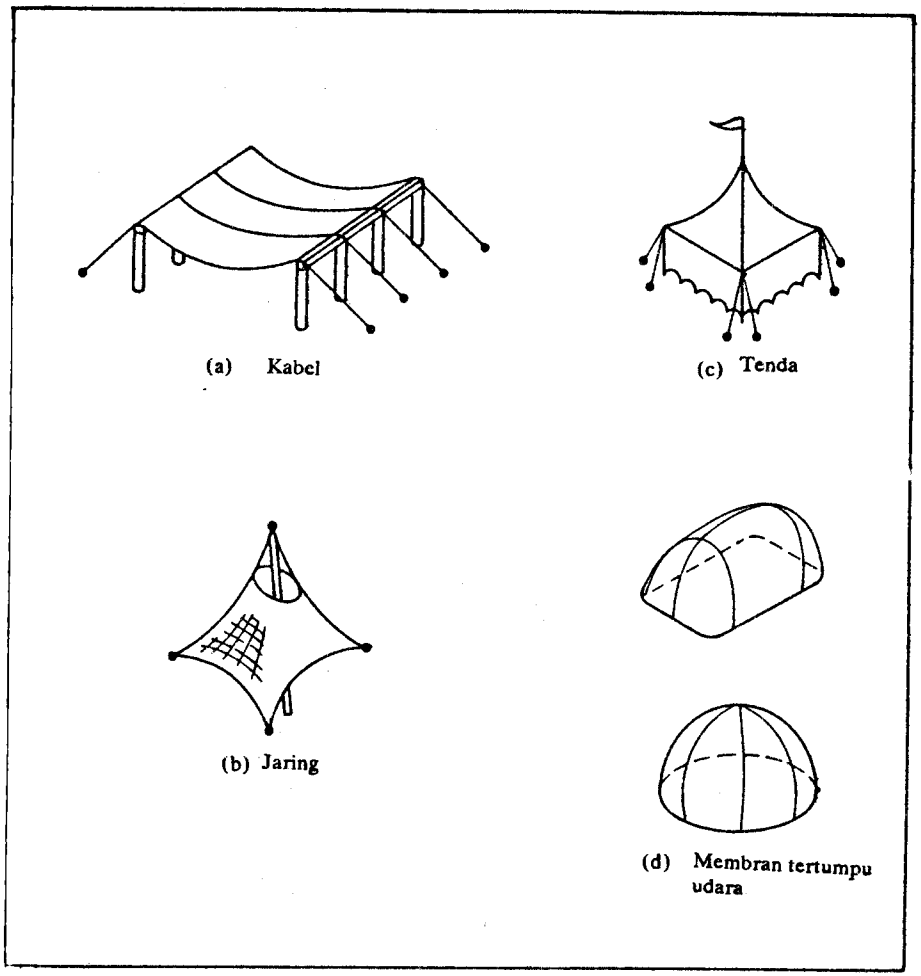
Struktur bentuk kubah dapat juga dibuat dari elemen-elemen garis, kaku, pendek, dengan pola berulang. Contoh struktur demikian adalah *kubah geodesik*.

Kabel. Kabel adalah elemen struktur fleksibel (lihat Gambar 1-5). Bentuknya sangat bergantung pada besar dan perilaku beban yang bekerja padanya. Apabila kabel ditarik pada kedua ujungnya saja, maka bentuknya lurus. Jenis kabel demikian disebut *tie-rod*. Jika kabel digunakan pada bentang antara dua titik dan memikul beban titik eksternal, maka bentuk kabel akan berupa segmen-segmen garis. Jika yang dipikul beban terbagi, maka kabel akan mempunyai bentuk lengkungan. Berat sendiri kabel dapat menyebabkan bentuk lengkung tersebut. (biasanya berbentuk *catenary-curve*).

Ada hubungan yang cukup erat antara bentuk kabel dan bentuk pelengkung. Jika bebannya sama, bentuk kabel akibat beban tersebut akan sama dengan bentuk pelengkung yang memikul beban sama tersebut. Bentuk yang satu merupakan inversi bentuk yang lain. Apabila terjadi tarik pada kabel, maka pada pelengkung terjadi tekan. Kabel dapat digunakan pada bentang yang panjang. Biasanya kabel digunakan pada jembatan yang memikul dek jalan raya beserta lalu lintas di atasnya. Karena beban lalu lintas selalu menyebabkan kabel utama mengalami perubahan bentuk karena berubah-ubahnya posisi beban, maka dek jembatan dibuat kaku sehingga permukaan jalan pada dasarnya tetap datar, dan beban yang diterima oleh kabel pada dasarnya konstan. Kabel juga dipakai untuk memikul permukaan atap pada gedung, khususnya pada situasi bentang besar. Akan tetapi, pada penggunaan ini perlu diperhatikan bahwa harus diusahakan agar permukaan atap tidak bergetar sebagai akibat berganti-gantinya angin (tekanan berganti menjadi isapan) (lihat Bab 3.2.3 dan 5.2). Struktur kabel dibahas lebih rinci pada Bab 5.

Membran, Tents, dan Jaring. Membran adalah lembaran tipis dan fleksibel. *Tent* biasa dibuat dari permukaan membran. Bentuk sederhana maupun kompleks dapat dibuat dengan menggunakan membran-membran. Untuk permukaan berkelengkungan-ganda, seperti permukaan bola, permukaan aktual harus dibuat sebagai susunan segmen yang jauh lebih kecil karena kebanyakan membran hanya tersedia dalam bentuk lembaran datar. Penggunaan membran fleksibel yang dipakai pada permukaan adalah menggantungnya dengan sisi cembung berarah ke bawah, ataupun jika digunakan dengan sisi cembung berarah ke atas, ditambah dengan mekanisme tertentu agar dapat mempertahankan bentuknya. Jenis terakhir ini misalnya struktur yang dikembangkan dengan udara (air-inflated). Bentuk membran dipertahankan oleh tekanan udara internal di dalam struktur. Mekanisme lain adalah dengan menggunakan gaya *jacking* eksternal yang menarik membran agar mampunyai bentuk tertentu. Berbagai struktur kulit-bertegangan (skin-stressed) adalah jenis tersebut. Sekalipun demikian, pratarik pada kulit mempunyai banyak pembatasan pada bentuk yang akan dibuat. Sebagai contoh, untuk permukaan bola sangat sulit dilakukan pratarik oleh gaya *jacking* eksternal, sedangkan bentuk hiperbolik-paraboloid cukup mudah.

Jaring **adalah permukaan tiga dimensi yang terbuat dari sekumpulan kabel lengkung yang melintang. Jaring mempunyai analogi dengan kulit membran. Dengan membolehkan suatu bukaan jaring divariasikan sesuai dengan keperluan, sangat banyak bentuk permukaan yang dapat diperoleh. Keuntungan penggunaan kabel melintang adalah bahwa penempatan kabel tersebut dapat mencegah atap dari getaran akibat tekanan dan isapan angin. Selain itu, gaya tarik umumnya dapat diberikan pada kabel dengan alat-alat *jacking* sehingga seluruh permukaan dapat mempunyai bentuk seperti kulit-tertarik. Hal ini juga memberikan stabilitas dan tahanan terhadap getaran pada atap. Membran dan jaring akan dibahas lebih mendalam pada Bab 11.**



Gambar 1-5 Struktur fleksibel tipikal.

1.2.3 Satuan Struktural Utama

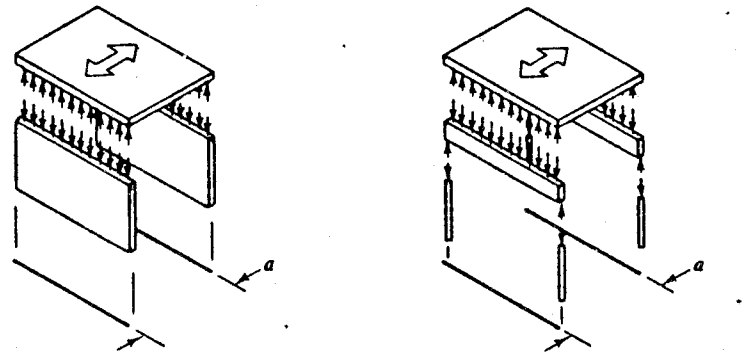
Sebelum ini telah kita bahas beberapa elemen dasar beserta fungsinya sebagai struktur pemikul beban. Dari pembahasan tersebut jelas bahwa beberapa di antaranya harus dikombinasikan dengan yang lainnya untuk memperoleh struktur yang menutup atau membentuk suatu volume. Karena itulah struktur yang digunakan pada gedung biasanya berbeda dengan yang digunakan pada bangunan lain. Struktur gedung selalu berperilaku pembentuk-volume, sementara bangunan lain tidak demikian. Sebagai contoh, struktur jembatan biasanya digunakan untuk memikul permukaan linear.

Dalam konteks tersebut akan berguna kalau kita memahami pengertian umum mengenai *satuan struktural utama* yang berupa elemen (atau susunan elemen) struktural bentuk-volume (lihat Gambar 1-2). Satuan struktural utama adalah struktur minimum yang layak digunakan pada konteks gedung, dan yang dapat digunakan baik secara individual maupun secara berulang. Sebagai contoh, empat kolom beserta permukaan bidang kaku yang ditumpu olehnya adalah satuan utama. Satuan seperti ini dapat ditumpuk maupun diletakkan bersebelahan sehingga membentuk sekumpulan satuan volume yang tergabung. Jika diletakkan bersebelahan, kolom-kolom biasanya digunakan bersama oleh masing-masing satuan. Satuan utama sering berupa peralihan antara sekumpulan elemen diskret (misalnya balok dan kolom) dan seluruh gedung. Bagaimana elemen diskret dapat digabungkan menjadi satuan merefleksikan bagaimana gedung tersebut secara aktual dilaksanakan, meskipun hal ini tidak selalu demikiam.

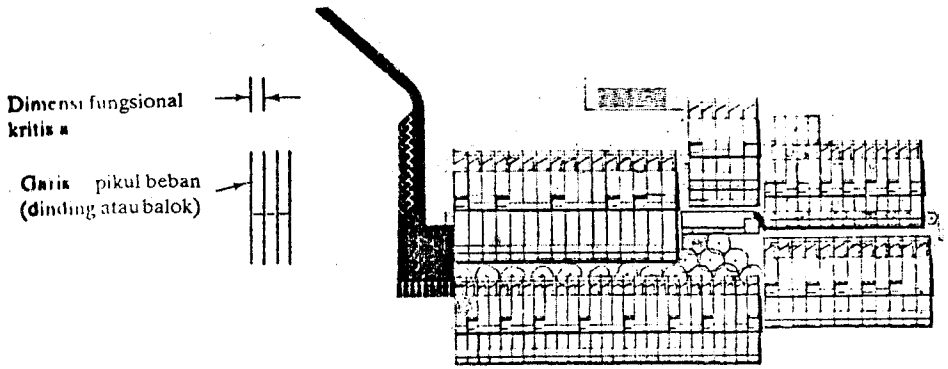
Kegunaan pemikiran mengenai struktur yang dinyatakan sebagai satuan-satuan seperti ini sangat terasa pada tahap prarencana. Manfaatnya adalah dimensi satuan selalu berkaitan dengan persyaratan gedung yang ditinjau. Sebagai contoh, sebagian besar gedung dapat dipandang terdiri atas kumpulan satuan volumetrik yang ukurannya berkaitan dengan penggunaan yang direncanakan. Salah satu contoh gedung demikian adalah rumah (lihat Gambar 1-6). Dalam hal ini, dimensi satuan struktural utama bergantung langsung pada dimensi fungsional satuan rumah itu sendiri. Sekalipun demikian, satuan struktur dapat lebih besar dan melebihi satuan fungsionalnya, tetapi tidak dapat lebih kecil daripada fungsional minimum. Dari sini jelaslah bahwa dimensi satuan struktural utama dapat sama atau lebih besar daripada dimensi fungsional kritis yang diasosiasikan dengan penggunaan gedung. Kelihatannya hal ini sangat sederhana, tetapi manfaatnya akan sangat terasa pada tahap prarencana, yang akan dibahas secara lebih rinci pada Bagian III buku ini.

Jenis gedung selain rumah akan mempunyai dimensi kritis satuan untuk jenis gedung tersebut. Dalam beberapa hal, perlu dicatat bahwa gedung dapat didefinisikan sebagai susunan yang terdiri atas satu satuan fungsional (misalnya *skating rink*), dan tidak terdiri atas volume *sel* yang tergabung. Dalam hal ini, satuan struktural utama tentu saja ekuivalen dengan keseluruhan struktur.

Seperti terlihat pada Gambar 1-2, ada elemen dasar yang telah berperilaku bentuk-volume sehingga dapat disebut sebagai satuan struktural utama, dan ada yang tidak. Sebagai contoh, elemen garis harus selalu digabung dengan cara tertentu untuk membentuk struktur bentuk-volume. Elemen permukaan kaku juga harus digunakan bersama elemen garis apabila strukturnya akan digunakan pada gedung. Sekalipun suatu elemen dasar telah mempunyai bentuk-volume, untuk dapat berfungsi dengan baik perlu digabungkan dengan elemen dasar lain. Sebagai contoh, seperti akan dibahas pada Bab 12, struktur kubah (yang tentu saja berbentuk-volume) tidak dapat digunakan sendiri, tetapi harus digunakan bersama cincin tarik untuk memikul gaya tarik akibat aksi beban pada struktur. Fakta ini akan dibahas pada bagian lain buku ini. Perilaku struktur yang berupa kombinasi dari berbagai satuan, bergantung pada perilaku interaktif setiap elemen.



(a) Satuan struktural utama yang mungkin ada pada perumahan. Salah satu di antara kedua GAMBAR tersebut dapat terjadi.



(b) Agregasi (penggabungan) satuan struktural utama pada rumah

GAMBAR 1-6 Satuan struktural utama dan susunannya di dalam rumah.

Proyek Pembinaan Perpustakaan
Jawa Timur
T. A. 1994 / 1995

Meskipun topik mengenai ini di luar lingkup buku ini, perlu dicatat bahwa ada pendekatan umum mengenai bagaimana elemen-elemen digabungkan untuk membentuk satuan yang dapat dinyatakan dan diklasifikasikan secara eksplisit. Oleh karena itu, hanya idenya yang merupakan hal penting. Gambar 1-2 mengilustrasikan beberapa satuan struktural utama. Jelasnya, ini hanya merupakan contoh karena sangat banyak cara elemen dasar digabungkan untuk membentuk satuan.

1.2.4 Penggabungan (Aggregations)

Seperti telah disebutkan di atas, satuan struktural utama dapat digabung hingga membentuk struktur yang lebih besar, yang pada dasarnya mempunyai perilaku berulang. Dalam konteks ini, tidak mudah untuk mengatakan bahwa perilaku penggabungan yang mungkin sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik, termasuk geometri dan kekakuan satuan struktural utama yang digunakan.

Seperti terlihat pada Gambar 1-2, satuan garis yang dibentuk dari bagian kecil kaku sangat bervariasi. Penggabungan sembarang karakter dapat dibuat dari jenis satuan demikian. Perlu dicatat bahwa ada cara untuk mengindentifikasi penggabungan (misalnya penggabungan linear, penggabungan planar). Sekalipun demikian, karakter satuan lain akan membatasi cara penggabungan yang dapat dilakukan. Khususnya tinjauan geometris sangat mempengaruhi cara penggabungan yang melibatkan permukaan lengkung. Sebagai contoh, penggabungan vertikal dengan melibatkan permukaan lengkung sangat sulit dilakukan. Kesulitan juga ada pada penggabungan yang melibatkan elemen permukaan fleksibel. Satuan-satuan ini hanya dapat digabung dengan cara khusus apabila hasil gabungannya akan diterapkan pada struktur gedung. Sebagai akibat dari pembatasan tersebut, penggabungan yang melibatkan elemen struktural fleksibel biasanya terjadi hanya dalam bidang horizontal, dengan elemen fleksibel menjadi permukaan atap. Dalam hal demikian, akan lebih efisien kalau digunakan penutup suatu luasan berupa satuan struktural besar dibandingkan penggabungan banyak elemen kecil (seperti yang akan dibahas lebih lanjut, struktur fleksibel sering kali mempunyai kemampuan untuk berbentang panjang). Gambar 1-2 mengilustrasikan contoh beberapa jenis penggabungan. Gambar 1-6(b) mengilustrasikan sekumpulan satuan garis yang digabung hingga membentuk struktur yang digunakan sebagai rumah.

1.3 DASAR ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR

1.3.1 Pendahuluan

Metode untuk mengklasifikasikan struktur yang telah dibahas pada Bab 1.2 telah memberikan tinjauan dasar sehubungan dengan bentuk geometris elemen struktural atau susunannya dan sifat fisik utamanya. Tepatnya, sistem klasifikasi deskriptif tersebut tidak merefleksikan hubungan yang harus ada di antara bagian-bagian yang berhubungan pada susunan struktur agar struktur dapat berfungsi sebagai satu

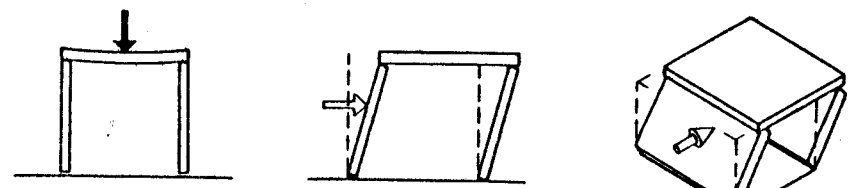
kesatuan. Secara mudah struktur disebutkan sebagai elemen-elemen yang digabung. Akan tetapi, setiap struktur nyata harus berfungsi sebagai satu kesatuan dalam memikul beban untuk disalurkan ke tanah. Setiap penggabungan elemen tidak menjamin secara implisit bahwa strukturnya dapat berlaku demikian. Keharusan suatu struktur berfungsi sebagai satu kesatuan dalam memikul beban dapat diilustrasikan dengan menggunakan *stabilitas* dasar dari struktur yang dibebani. Ide mengenai stabilitas ini diuraikan berikut ini.

Aspek pembatasan lain dari klasifikasi deskriptif dari Bab 1-2 adalah bahwa klasifikasi tersebut tidak merefleksikan banyak perbedaan penting dalam desain suatu struktur. Sebagai contoh, klasifikasi tersebut tidak menyebutkan perbedaan yang mungkin ada di antara mekanisme-mekanisme pemikul-beban internal yang terlibat. Peninjauan mengenai bagaimana secara eksak suatu struktur atau elemen struktur memikul beban, merupakan hal-hal yang diperlukan oleh perencana dalam merancang struktur untuk konteks tertentu. Pembahasan berikut ini adalah pendahuluan mengenai kestabilan pada elemen struktur pemikul beban. Metode klasifikasi lain untuk struktur berdasarkan konsep yang dibahas pada bagian ini juga akan dibahas.

1.3.2 Kestabilan Struktur

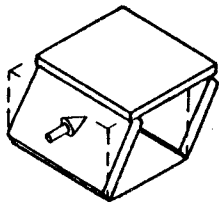
Tinjauan dasar dalam merencanakan struktur adalah dengan menjamin adanya kestabilan pada segala kondisi pembebanan yang mungkin. Semua struktur mengalami perubahan bentuk tertentu apabila dibebani. Pada struktur stabil, deformasi yang diakibatkan oleh beban pada umumnya kecil, dan gaya internal yang timbul di dalam struktur mempunyai kecenderungan mengembalikan bentuk struktur ke bentuk semula apabila bebannya dihilangkan. Pada struktur tidak stabil, deformasi yang diakibatkan oleh beban pada umumnya mempunyai kecenderungan untuk terus bertambah selama struktur tersebut dibebani. Struktur yang tidak stabil tidak memberikan gaya-gaya internal yang mempunyai kecenderungan mengembalikan struktur ke bentuk semula. Struktur yang tidak stabil mudah mengalami *collapse* (runtuh) secara menyeluruh dan seketika begitu dibebani. Tanggung jawab perencana strukturlah untuk menjamin struktur yang tidak membentuk konfigurasi yang tidak stabil.

Stabilitas sering kali merupakan hal sulit di dalam perencanaan struktur yang merupakan gabungan dari elemen-lemen diskret. Sebagai contoh, berdasarkan teori, struktur tiang-dan-balok pada Gambar 1-7(a) stabil. Akan tetapi, untuk suatu perubahan sedikit dalam kondisi pembebanan, misalnya apabila ada gaya horizontal pada struktur, dapat terjadi deformasi seperti terlihat pada Gambar 1-7(b). Jelaslah bahwa struktur tersebut tidak mempunyai kapasitas untuk menahan beban horizontal, juga tidak mempunyai mekanisme apa pun yang mengembalikannya ke bentuk semula apabila beban horizontal tersebut dihilangkan. Perubahan besar pada sudut yang terjadi di antara elemen struktur menunjukkan ketidakstabilan struktur, yaitu merupakan awal terjadinya *collapse*. Struktur tiang-dan-balok ini akan *collapse* apabila dibebani demikian. Dengan demikian, pola elemen struktur seperti

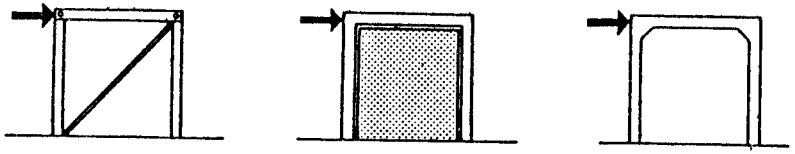


(a) Susunan kolom-dan-balok

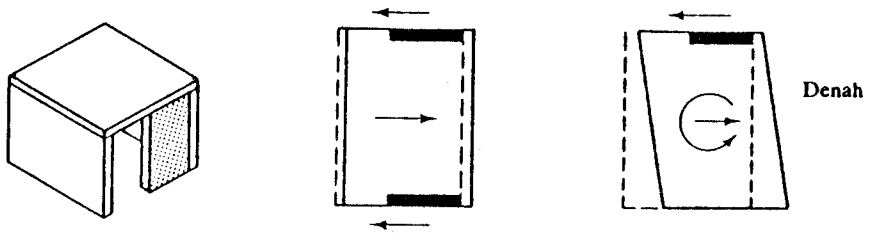
(b) Ketidakstabilan terhadap beban horizontal



(c) Ketidakstabilan pada susunan plat-dan-dinding



(d) Tiga metode dasar untuk menjamin kestabilan struktur sederhana; penyokong *(bracing)* diagonal, bidang geser, dan titik hubung kaku



(e) Setiap metode yang dipakai untuk menjamin kestabilan pada struktur harus dipasang secara simetris. Apabila tidak, dapat terjadi efek torsional pada struktur.

GAMBAR 1-7 Kestabilan struktur.

ini disebut *mekanisme runtuh (collapse).* Hubungan dan pola lain antara elemen struktur juga ada yang membentuk mekanisme runtuh.

Ada beberapa cara dasar untuk mengubah struktur berdiri-sendiri yang bentuk umumnya seperti terlihat pada Gambar 1-7(b) menjadi konfigurasi stabil. Ini diilustrasikan pada Gambar 1-7(d). Yang pertama adalah dengan menambah elemen struktur *diagonal* pada struktur. Dengan demikian, struktur tidak dapat mengalami deformasi menjadi jajaran genjang seperti terlihat pada Gambar 1-7(b) tanpa adanya perubahan besar pada panjang elemen diagonal (perubahan besar ini tidak akan terjadi kalau elemen diagonal dirancang cukup untuk memikul beban tersebut). Metode lain untuk menjamin kestabilan adalah dengan menggunakan *dinding geser.* Elemen ini berupa elemen permukaan bidang kaku, yang tentu saja dapat menahan deformasi akibat beban horizontal tersebut. Beton bertulang atau dinding bata dapat digunakan sebagai dinding geser. Baik dinding penuh maupun sebagian, dapat digunakan (ukuran dinding tersebut bergantung pada besar gaya yang bekerja padanya. Metode sederhana lain untuk menjamin kestabilan adalah dengan mengubah hubungan antara elemen struktur sedemikian rupa sehingga perubahan sudut yang terjadi berharga konstan untuk suatu kondisi pembebanan tertentu. Hal ini dilakukan dengan membuat titik hubung kaku di antara elemen struktur. Titik hubung demikian sangat umum digunakan. Sebagai contoh, meja adalah struktur stabil karena adanya titik hubung kaku di antara setiap kaki meja dengan permukaan meja, yang menjamin hubungan sudut konstan di antara elemen-elemen tersebut. Struktur yang menggunakan titik hubung kaku untuk menjamin kestabilan sering disebut sebagai *rangka (frame).*

Tentu saja ada berbagai cara lain untuk menjamin kestabilan struktur. Dapat pula menggunakan gabungan dari cara dasar yang telah disebutkan sebelum ini, misalnya elemen struktur dihubungkan secara kaku dan mempunyai elemen diagonal. Hal ini tentu saja memperbesar derajat kestatik-tak-tentuannya.

Pertanyaan mengenai kestabilan juga muncul dalam situasi lain. Seperti yang akan dibahas pada bagian berikut, elemen struktur panjang yang mengalami gaya tekan dapat mempunyai potensi tidak stabil apabila dibebani. Demikian pula permukaan cangkang (yaitu struktur yang terdiri atas permukaan-permukaan lengkung), juga mempunyai potensi ketidakstabilan (dapat mengalami *snap through*) apabila dibebani. Contoh-contoh tersebut, juga hal-hal lain mengenai kestabilan struktur apabila dibebani akan dibahas pada bab-bab berikut.

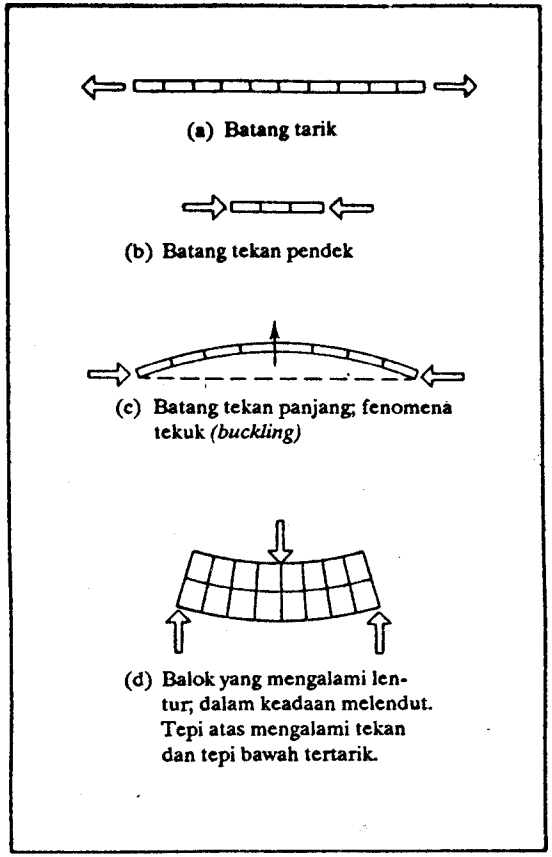
1.3.3 Keadaan Gaya Dalam : Tarik, Tekan, dan Lentur

Keadaan Gaya Fundamental. Ada dua keadaan gaya internal fundamental yang timbul di dalam struktur sebagai akibat aksi sistem gaya eksternal, yaitu *tarik* dan *tekan.* Apabila sistem gaya eksternal benar-benar bekerja di sepanjang sumbu memanjang batang, maka akan timbul gaya tekan atau tarik merata di dalam batang, bergantung pada gaya luar yang bekerja (lihat Gambar 108). Aksi umum gaya-gaya ini menyebabkan terputusnya atau hancurnya material, bergantung pada apakah gaya yang ada berupa tarik atau tekan. Kapasitas pikul beban batang tarik umumnya bergantung pada jenis material yang dipakai dan pada luas penampang

batang. Faktor-faktor tersebut juga menentukan kapasitas pikul batang tekan. Akan tetapi, kapasitas pikul beban batang tekan yang relatif panjang mempunyai kecenderungan berkurang apabila batang semakin panjang. Batang tekan yang panjang cenderung tidak stabil apabila dibebani, dan menekuk tiba-tiba pada taraf beban tertentu yang disebut beban kritis. Ketidakstabilan tiba-tiba biasanya terjadi tanpa adanya kehancuran material. Sekalipun demikian, apabila ini terjadi, struktur tersebut tetap dalam keadaan berdeformasi karena tidak dapat memberi gaya internal untuk mengembalikan struktur ke bentuk semula. Apabila dibebani terus, akhirnya elemen struktur tersebut mengalami kegagalan dengan melentur. Fenomena demikian disebut tekuk (buckling). Karena fenomena demikian, batang tekan yang panjang tidak mempunyai kemampuan pikul beban besar. Hal ini tidak terjadi pada batang yang mengalami gaya tarik. Panjang batang tarik tidak begitu mempengaruhi kapasitas pikul bebannya. Konsep mengenai hal yang disebutkan di atas akan dibahas secara lebih rinci pada Bab 7.

Ada jenis keadaan gaya lain yang melibatkan kombinasi gaya tarik dan tekan internal. Apabila suatu elemen struktur memikul beban eksternal yang bekerja transversal terhadap sumbu memanjang elemen tersebut (tidak dalam arah sumbu memanjang terhadap elemen struktur), aksi gaya-gaya eksternal menyebabkan terjadinya lenturan. Apabila suatu elemen struktur melentur karena dibebani, maka terjadi perubahan bentuk dengan cara seperti terlihat pada Gambar 1-8(d). Jenis deformasi ini mempunyai ciri adanya sebagian serat yang mengalami perpanjangan, dan sebagian yang lain mengalami perpendekan. Pada Gambar 1-8(d) juga jelas terlihat bahwa memanjang dan memendeknya elemen struktur dapat terjadi pada penampang yang sama. Sehubungan dengan fenomena ini tentu ada gaya tarik dan tekan. Elemen struktur dapat melentur karena dibebani transversal adalah karena tarik dan tekan tersebut. Dengan demikian ada gaya tarik dan tekan internal pada penampang yang sama dan disebut *momen lentur (bending).* Elemen struktur ini, yang mengalami lentur demikian, umumnya disebut balok.

Tarik, Tekan, dan Lentur: Sebuah Perbandingan. Pada klasifikasi sebelum ini dapat terjadi suatu elemen struktur lebih peka terhadap gaya tertentu dan tidak lebih peka terhadap gaya lainnya. Sebagai contoh, elemen struktur yang mengalami tarik murni dapat memikul beban tarik besar untuk suatu ukuran tertentu elemen tersebut. Elemen struktur pendek yang mengalami beban tekan juga dapat memikul beban tekan yang relatif sama. Akan tetapi, apabila elemen struktur tersebut panjang, maka kapasitas pikul bebannya akan berkurang apabila elemen struktur tersebut semakin panjang. Elemen yang mengalami lentur hanya dapat memikul beban relatif kecil dibandingkan dengan gaya tarik murni untuk suatu ukuran tertentu. Untuk keadaan tersebut, perbedaan relatif kapasitas pikul beban tidak dapat ditentukan secara kuantitatif. Sebagai contoh, tongkat kecil yang panjang dapat dengan mudah dipatahkan dengan tangan, yaitu dengan membebaninya dalam arah transversal dari sumbu memanjangnya. Selain itu, dapat dipatahkan dengan tangan, yaitu dengan menekannya, tetapi hal ini biasanya lebih sulit, bergantung pada panjang tongkat. Untuk ukuran tongkat yang umum dijumpai, tidak mungkin kita dapat dengan tangan menekannya hingga putus. Analogi hal ini dapat diterapkan pada struktur.



GAMBAR 1-8 Keadaan gaya internal: tarik, tekan, dan lentur.

Prinsip Desain Umum. Pengenalan adanya perbedaan kapasitas pikul beban suatu elemen struktur terhadap tarik, tekan, dan lentur adalah hal mendasar dalam merencanakan struktur yang efisien. Tujuan umum desain struktural sering kali berupa minimisasi lentur pada struktur. Teknik untuk melakukan hal ini sangat bervariasi, tetapi prinsipnya selalu sama. Tujuan desain lainnya adalah minimisasi penggunaan batang tekan panjang. Elemen yang lebih diinginkan adalah elemen struktur tarik murni atau elemen struktur tekan pendek. Prinsip desain lainnya adalah kesesuaian jenis keadaan gaya yang ada dan pemilihan material yang cocok sehingga karakteristik material dapat dimanfaatkan dengan baik.

1.3.4 Sistem Satu Arah dan Dua Arah

Cara yang sangat dasar untuk membedakan struktur adalah berdasarkan organisasi (dalam ruang) sistem tumpuan dan hubungan antara struktur dengan tumpuan

yang ada. Dua hal utama yang penting berdasarkan hal tersebut adalah sistem satu arah dan dua arah. Pada *sistem satu arah,* mekanisme transfer beban yang ada pada struktur untuk menyalurkan beban eksternal ke tanah adalah pada satu arah saja. Pada sistem *dua arah,* arah mekanisme transfer beban lebih rumit, tetapi selalu melibatkan paling sedikit dua arah. Balok linear yang membentang di antara dua titik tumpuan merupakan salah satu contoh sistem satu arah [lihat Gambar 1-9 (a)]. Sistem yang terdiri atas dua elemen saling melintang dan terletak pada dua kumpulan titik tumpuan yang tidak terletak pada garis yang sama dan kedua elemen itu bekerja sama memikul beban luar sembarang, merupakan contoh sistem dua arah. Plat kaku, datar, dan bujursangkar yang terletak di atas empat tumpuan di tepinya juga merupakan sistem dua arah. Pada sistem ini beban eksternal tidak dapat dianggap hanya dipikul oleh tumpuan dalam hanya satu arah.

Perbedaan nyata antara aksi struktural satu arah dan dua arah adalah dalam konteks desain. Seperti yang akan dibahas secara rinci pada bagian lain di dalam buku ini, ada beberapa situasi yang umumnya melibatkan pola tertentu di dalam sistem tumpuan yang digunakan, yang sering menghasilkan keuntungan (dinyatakan dalam penggunaan material secara efisien) dalam menggunakan sistem dua arah dibandingkan dengan sistem satu arah. Akan tetapi, pola-pola lain pada sistem tumpuan dapat pula memberikan hasil sebaliknya. Karena alasan itulah maka sangat berguna kalau sejak awal kita dapat membedakan sistem satu arah dan sistem dua arah.

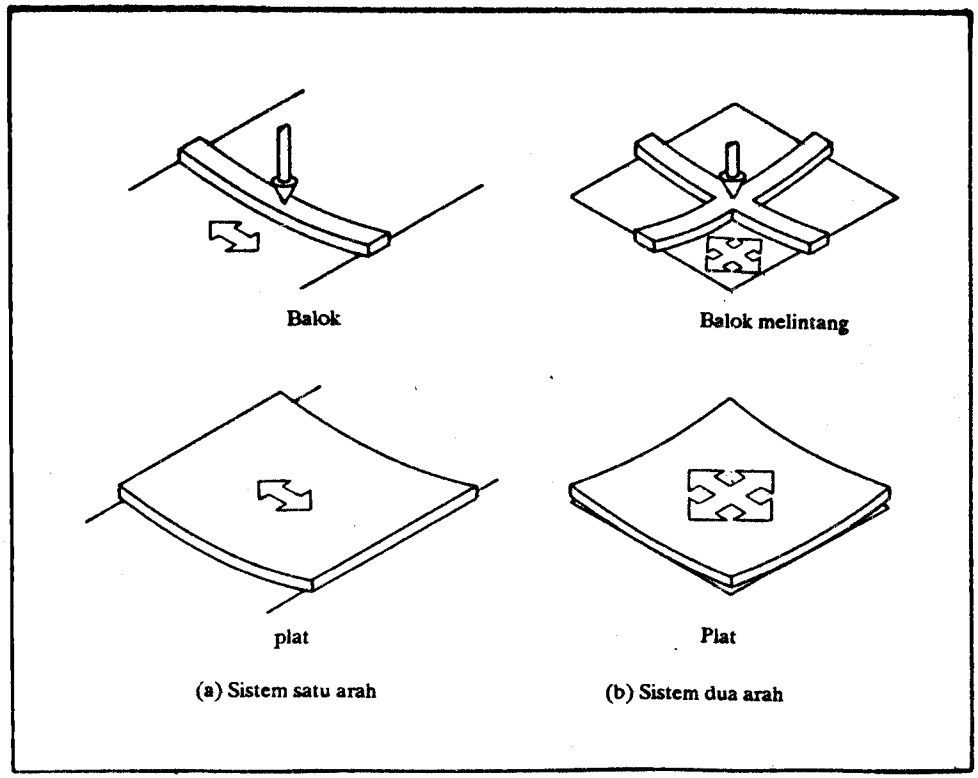
1.4 SUSUNAN STRUKTUR

1.4.1 Struktur Sel

Banyak struktur lengkap yang dapat digolongkan sebagai pemikul beban dengan cara tarik, tekan, atau lentur. Akan tetapi, hampir keseluruhan struktur mempunyai elemen-elemen yang melibatkan kombinasi keadaan gaya-gaya tersebut.

Gambar 1-10 mengilustrasikan beberapa di antara sistem struktur yang mungkin dalam membentuk sel volumetrik tunggal sederhana. Sistem yang membentang horizontal dapat terdiri atas deretan balok-balok (atau rangka batang) satu arah dan elemen-elemen plat dua atau satu arah yang kaku. Sistem yang membentang secara horizontal pada Gambar 1-9 memperlihatkan keadaan lentur apabila beban vertikal bekerja pada elemen struktur.

Sistem tumpuan vertikal pada sel yang sama dapat berupa dinding pemikul beban atau susunan balok serta kolom. 'Elemen kolom dan dinding pemikul pada umumnya mengalami tekan meskipun dapat pula terjadi lentur untuk keadaan tertentu. Sangat penting apabila pemilihan altlernatif dari contoh-contoh yang telah disebutkan di atas digunakan agar juga dapat menjamin kestabilan lateral (lihat Gambar 1-10). Pilihan-pilihan yang digambar tersebut dapat mempengaruhi apakah elemen struktur memikul atau tidak memikul lentur. Sebagai contoh, elemen pada rangka selalu mengalami lentur (lihat Bab 9).

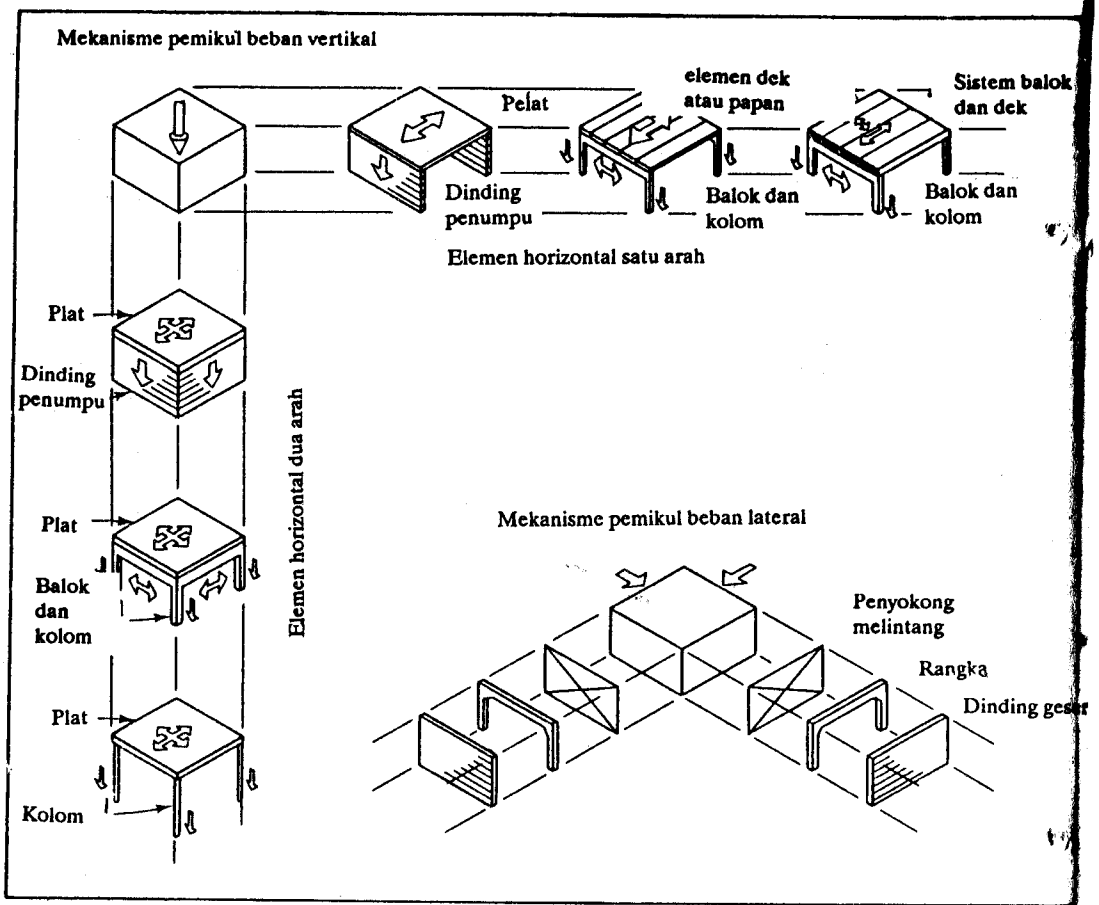


GAMBAR 1-9 Sistem struktural dua arah dan satu arah.

Struktur yang lebih rumit daripada yang diperlihatkan biasanya dapat diuraikan ke dalam kumpulan dari elemen-elemen dasar yang mengalami satu atau lebih keadaan gaya utama. Teknik untuk menguraikan ini akan dibahas pada Bab 3.

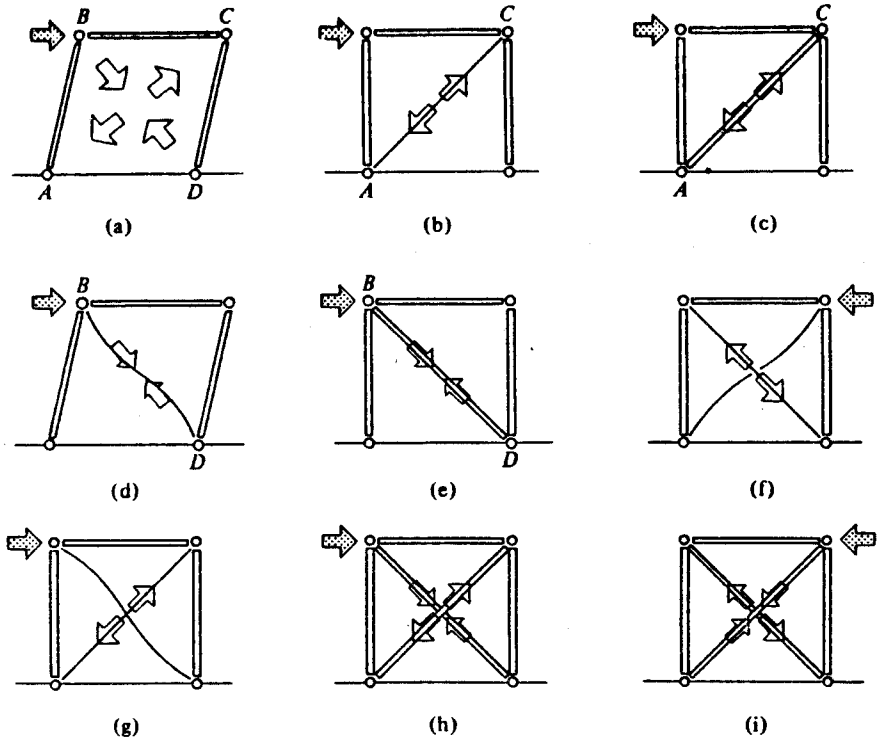
1.4.2 Optimasi Desain

Pemilihan struktur untuk suatu hal tertentu sering kali melibatkan masalah optimasi. Sistem diagonal dapat dirancang untuk menjamin kestabilan lateral untuk struktur sel yang telah dibahas sebelum ini (lihat Gambar 1-10 dan 1-11). Seperti terlihat pada Gambar 1-11, apakah suatu elemen diagonal memikul tarik atau tekan bergantung pada orientasinya. Perencana dapat memilih orientasi diagonal sedemikian rupa sehingga hanya gaya tarik yang ada pada batang tersebut. Untuk itu kabel dapat digunakan. Alternatif lain, diagonal dapat dirancang dengan orientasi tertentu untuk memikul gaya tekan. Untuk itu kita dapat menggunakan elemen kaku pemikul tekan. Sejalan dengan prinsip-prinsip desain yang telah dibahas pada Bab 1.3.3, pilihan pertamalah yang lebih diinginkan. Akan tetapi, perencana harus benar-benar yakin bahwa elemen tersebut berfungsi sebagai penjamin kestabilan untuk semua kondisi pembebanan yang mungkin. Tentu saja apabila beban hori-



GAMBAR 1-10 Pilihan struktural umum untuk satu satuan volumetrik tipikal.

zontal tersebut berbalik arah, struktur akan runtuh jika hanya dirancang dengan menggunakan kabel tunggal karena kabel tersebut tidak dapat memikul gaya tekan yang diperlukan dalam menjamin kestabilan struktur terhadap beban baru tersebut. Untuk beban yang dapat berbalik arah itu, sistem penjamin kestabilan dapat berupa kabel menyilang seperti terlihat pada Gambar 1-11. Alternatif lain, perencana dapat menggunakan satu elemen diagonal yang mampu memikul gaya tarik maupun tekan sehingga dapat menjamin kestabilan struktur pada beban-beban yang berbalik arah. Dengan demikian, perencana berhadapan dengan masalah optimasi, apakah menggunakan satu elemen kaku diagonal ataukah dua kabel menyilang. Hal ini tidak dapat dengan mudah ditentukan. Masih diperlukan tinjauan desain lebih lanjut dan pembahasan kriteria lain, misalnya volume material yang digunakan. Optimasi demikian sangat sering dijumpai dalam desain struktural.



(a) Bentuk berdeformasi dari struktur yang dihubungkan sendi tanpa menggunakan diagonal. Jarak semula antara titik-titik *A* dan *C* cenderung bertambah, sedangkan antara *B* dan *D* berkurang.

(b) Kabel yang diletakkan di antara titik-titik *A* dan *C* akan mengalami gaya tarik karena harus menahan kecenderungan bertambahnya jarak titik-titik tersebut. Kabel tersbur menstabilkan struktur dan mencegahnya dari keruntuhan.

(c) Elemen kaku yang diletakkan di antara *A* dan *C* akan berfungsi sama dengan kabel. Timbul gaya tarik pada elemen struktur tersebut.

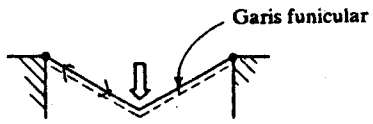
(d) Dengan memasang kabel di antara titik *B* dan *D*, keruntuhan struktur akan dicegah. Titik-titik tersebut bergerak saling mendekati. Kabel yang diletakkan di antara titik-titik ini akan dengan mudah menekuk. Hal yang sama juga akan terjadi pada kabel (b) apabila arah beban berbalik.

(e) Dengan menggunakan elemen kaku di antara titik *B* dan *D* akan terjadi kestabilan struktur. Gaya tekan akan timbul di dalam elemen struktur tambahan tersebut.

(f) dan (g) Agar kestabilan struktur benar-benar dijamin terhadap beban dari kedua arah, gunakanlah sistem kabel yang menyilang. Dalam keadaan dibebani pada satu arah, salah satu kabel akan bekerja memikul gaya tarik. Untuk keadaan beban lawannya, kabel lainnya yang bekerja.

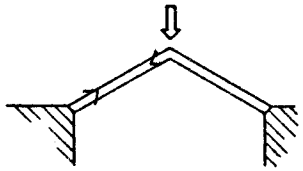
(h) dan (i) Elemen kaku yang menyilang dapat pula digunakan, tetapi hal ini menambah besar derajat redunansi karena satu diagonal kaku saja sudah mampu menstabilkan struktur terhadap kedua arah beban.

GAMBAR 1-11 Penstabilan struktur sederhana dengan menggunakan diagonal.

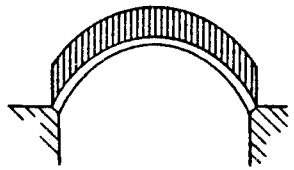


(a) Struktur dalam keadaan tarik: bentuk ditentukan oleh kabel fleksibel yang mengalami suatu pembebanan disebut bentuk *funicular* untuk beban tersebut.

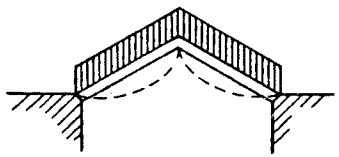
(b) Struktur tarik: Bentuk funicular untuk beban terdistribusi merata.



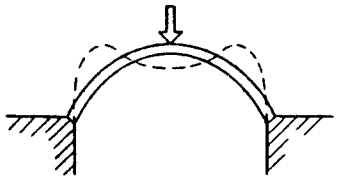
(c) Struktur tekan: Dengan membalik bentuk kabel fleksibel yang dibebani terpusat akan diperoleh bentuk yang hanya memikul gaya aksial tekan.



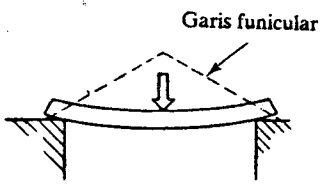
(d) Struktur tekan: Dengan membalik funicular tarik akan diperoleh bentuk yang memikul beban dengan aksial tekan. Struktur *pelengkung* merupakan salah satu jenis struktur *funicular* demikian.



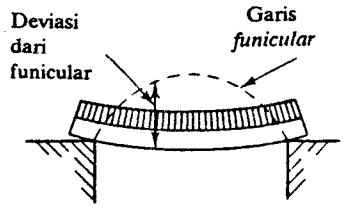
(e) Struktur lentur: Struktur yang bersifat *funicular* untuk beban terpusat akan mengalami lentur apabila bebannya berubah.



(f) Struktur yang mengalami lentur: Struktur *funicular* terhadap beban terdistribusi akan mengalami lentur apabila bebannya berubah.



(g) Struktur lentur: Apabila bentuk struktur tidak sesuai dengan bentuk *funicular* beban, akan selalu ada lentur.



(h) Struktur lentur: Deviasi pada sembarang titik antara struktur dan bentuk *funicular* bebannya umumnya merefleksikan besar momen lentur pada titik tersebut.

GAMBAR 1-12 Bentuk struktur *funicular* dan *nonfunicular*.

1.5 STRUKTUR FUNICULAR

1.5.1 Karakteristik Dasar

Banyak struktur utuh yang dapat digolongkan ke dalam keadaan tekan atau tarik murni. Struktur yang menarik ini memerlukan perlakuan khusus. Tinjaulah kabel fleksibel sederhana yang membentang di antara dua titik dan memikul beban. Struktur ini harus berada dalam keadaan tarik karena kabel fleksibel tidak dapat menahan tekan maupun lentur. Kabel yang memikul beban terpusat di tengah bentangnya akan berubah bentuk seperti terlihat pada Gambar 1-12(a). Keseluruhan struktur mengalami tarik. Jika bentuk ini dibalik, maka jelaslah bahwa struktur yang dihasilkan akan berada dalam keadaan tekan. Apabila kondisi bebannya diganti dengan beban terbagi rata, maka kabel fleksibel yang memikul beban ini akan berubah bentuk menjadi parabola seperti terlihat pada Gambar 1-12(b). Struktur ini juga dalam keadaan tarik. Apabila bentuk eksak ini dibalik dan dibebani dengan beban merata yang sama, maka struktur tersebut akan berada dalam keadaan tekan [Gambar 1-11(d)]. Pelengkung pada umumnya merupakan struktur yang bersifat seperti ini.

Struktur-struktur yang hanya berada dalam keadaan tarik atau tekan, yang dipengaruhi oleh beban, disebut *struktur funicular*. Perlu dicatat bahwa tidak seperti balok yang dibebani transversal, struktur *funicular* ini hanya mengalami tarik atau tekan, tanpa adanya lentur.

Mengapa balok linear mengalami lentur sedangkan kabel tidak, tentu saja tidak bergantung pada material yang digunakan. Kabel tidak dapat menahan lentur sehingga akan berubah bentuk, bergantung pada material yang digunakan. Kabel tidak dapat menahan lentur sehingga akan berubah bentuk, bergantung pada beban yang diterimanya. Balok linear kaku dapat menahan lentur sehingga tidak berubah bentuk seperti kabel. Material saja tidak dapat menjelaskan mengapa struktur tertentu dapat berfungsi menahan lentur sedangkan yang lainnya tidak. Pelengkung (arch), yang pada umumnya berada dalam keadaan tekan, sering dibuat dari material kaku.

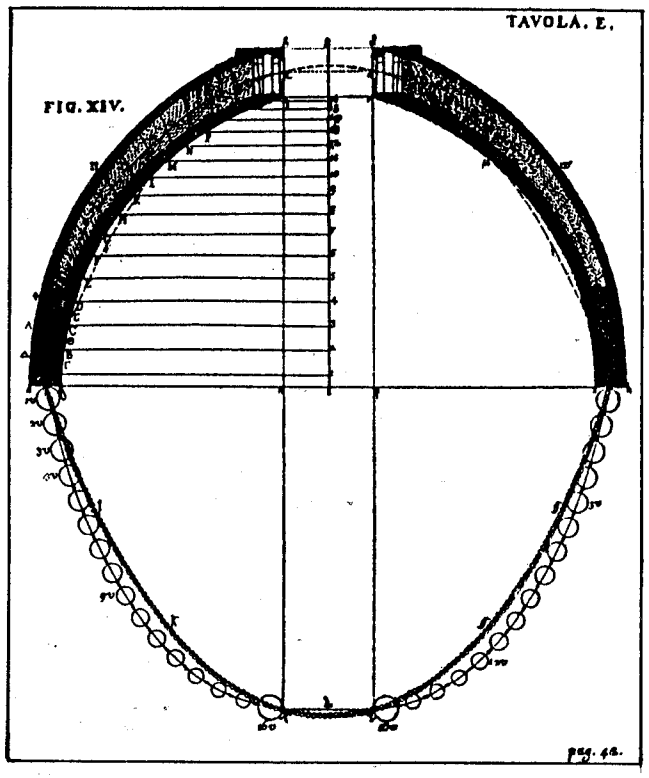
Tentu saja *bentuk* struktur merupakan hal utama yang menentukan apakah struktur tersebut mengalami tarik, atau tekan, atau lentur.

Pentingnya bentuk struktur akan jelas dari Gambar 1-12. Bentuk linear yang mempunyai puncak akan berada dalam keadaan tekan apabila mengalami beban vertikal terpusat, dan akan berubah mengalami lentur apabila bebannya menjadi terbagi rata seperti terlihat pada Gambar 1-12(e). Dengan cara yang sama, bentuk parabola yang mengalami tekan apabila dibebani merata, akan mengalami lentur apabila bebannya menjadi terpusat [lihat Gambar 1-12(f)]. Jelaslah bahwa ada hubungan yang pasti antara bentuk dan beban apabila struktur diinginkan hanya memikul tekan atau tarik.

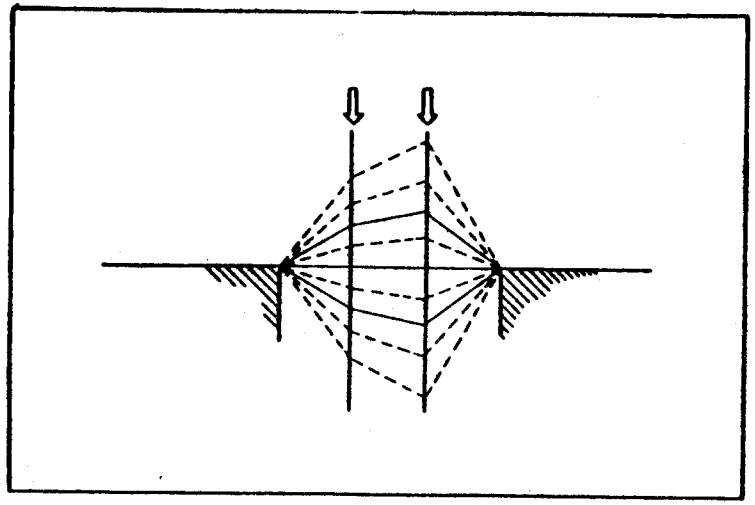
Cara termudah untuk menentukan respons *funicular* pada kondisi pembebanan tertentu adalah dengan menentukan perubahan bentuk eksak kawat fleksibel apabila mengalami beban tersebut. Ini adalah *funicular* tarik. Dengan membalik bentuk ini akan diperoleh *funicular* tekan. Hanya ada satu bentuk *funicular* untuk

setiap kondisi beban. Lentur akan timbul pada struktur apabila bentuk struktur diubah. Gambar 1-13 mengilustrasikan analisis struktur (pada waktu lampau) yang didasarkan atas anggapan bahwa struktur pelengkung merupakan bentuk terbalik dari *catenary*.

Prinsip umum lainnya dapat diperoleh dari contoh-contoh sederhana yang telah dibahas sejauh ini. Perhatikan bahwa bentuk struktur *funicular selalu berubah bergantung pada beban eksternal*. Jika struktur tidak dibebani, ia akan tetap lurus. Karena itulah bentuk *funicular* yang cocok digunakan untuk beban merata berubah secara kontinu. Hal yang sama juga berlaku, yaitu jika bentuk struktur berubah sedangkan bebannya tidak, maka akan ada lentur. Perlu dicatat bahwa apabila bentuk suatu struktur *funicular* dibayangkan tergabung pada struktur aktual yang ditinjau, maka besar deviasi struktur aktual dari bentuk *funicular* pada umumnya merefleksikan besar lentur yang ada pada struktur aktual [lihat Gambar 1-12(g) dan (h)]. Hal ini akan dibahas lebih mendalam pada bagian lain buku ini.



GAMBAR 1-13 Kubah St. Peter, Roma. Konstruksi garis *thrust* merupakan *catenary* terbalik (dari Polemi, Memorie instoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano, 1748).

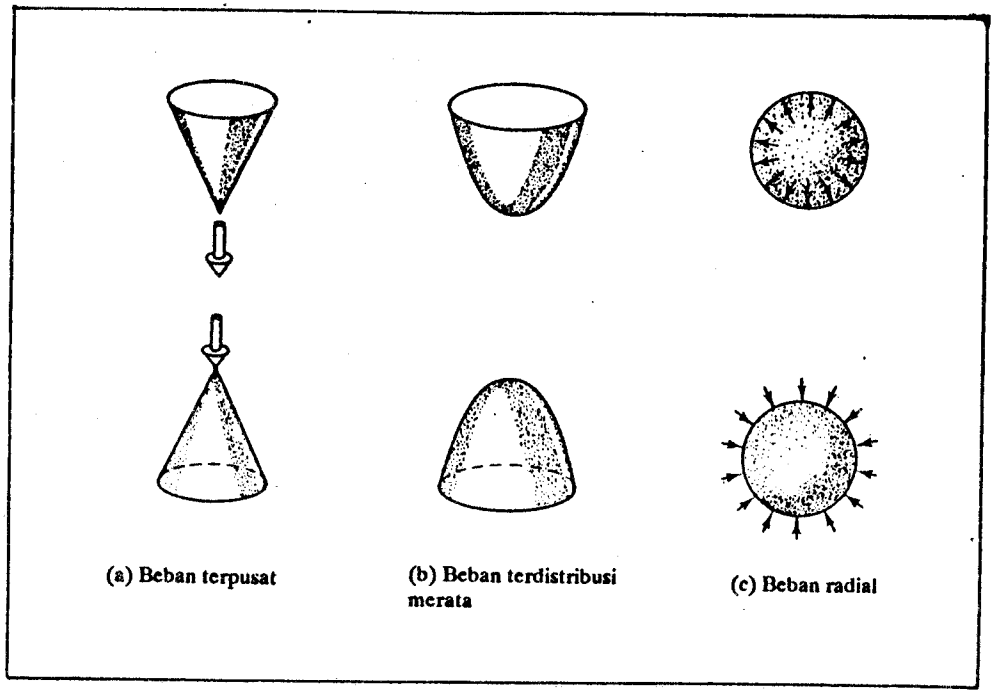


GAMBAR 1-14 Kumpulan bentuk *funicular* untuk sepasang beban tertentu. Proporsi relatif semua bentuk ini sama.

Hanya ada satu bentuk umum struktur yang *funicular* untuk kondisi pembebasan yang diberikan, juga ada kumpulan struktur yang mempunyai bentuk umum yang sama untuk kondisi pembebanan tersebut. Semua struktur yang terlihat pada Gambar 1-14, misalnya, adalah *funicular* untuk sepasang beban yang diberikan seperti tergambar. Jelasnya, semua struktur pada suatu kumpulan mempunyai bentuk yang sama, tetapi dimensi fisiknya berbeda. Pada satu kumpulan, proporsi relatif semua bentuk itu identik. Pada Gambar 1-14 jelas terlihat bahwa kumpulan struktur untuk beban tersebut dapat secara mudah diperoleh, yaitu dengan menggunakan sekumpulan kabel yang panjangnya berbeda-beda. Besar gaya internal yang timbul di dalam elemen struktur tersebut bergantung pada tinggi struktur yang ada (gaya besar terjadi pada bentuk yang semakin dangkal, begitu pula sebaliknya).

Jelas pula bahwa *funicular* tidak hanya struktur dua dimensi, tetapi dapat pula tiga dimensi seperti terlihat pada Gambar 1-15. Sebagai contoh adalah bentuk membran fleksibel apabila dibebani merata. Karena respons *funicular* tidak mengikuti bentuk permukaan bola, tetapi bentuk parabolik, maka cangkang permukaan bola yang sering digunakan tidak menunjukkan respons *funicular* terhadap beban vertikal. Bentuk bola ini mempunyai respons *funicular* untuk jenis beban seperti terlihat pada Gambar 1-15(c). Akan tetapi, hal ini tidak membatasi penggunaannya karena ada mekanisme lain yang bekerja, yaitu gaya melingkar pada struktur cangkang tersebut, sehingga masih memberikan keadaan yang efisien. Mekanisme ini akan dibahas pada Bab 12.

Gambar 1-16 mengilustrasikan contoh terkenal aplikasi bentuk *funicular* tiga dimensi sebagai dasar dalam menentukan bentuk struktur.

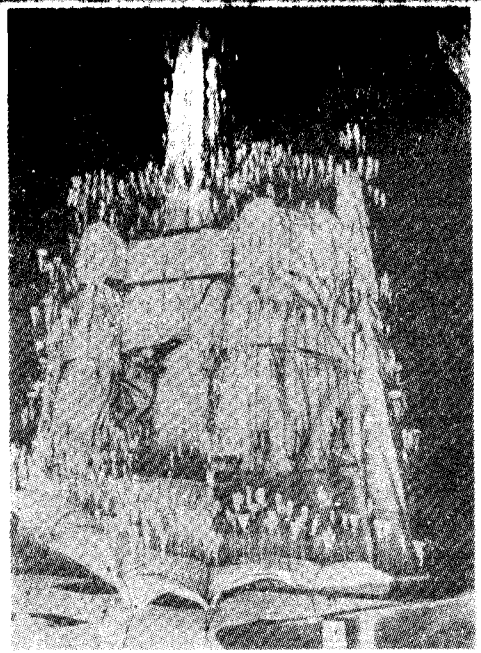


GAMBAR 1-15 Struktur *funicular* tiga dimensi.

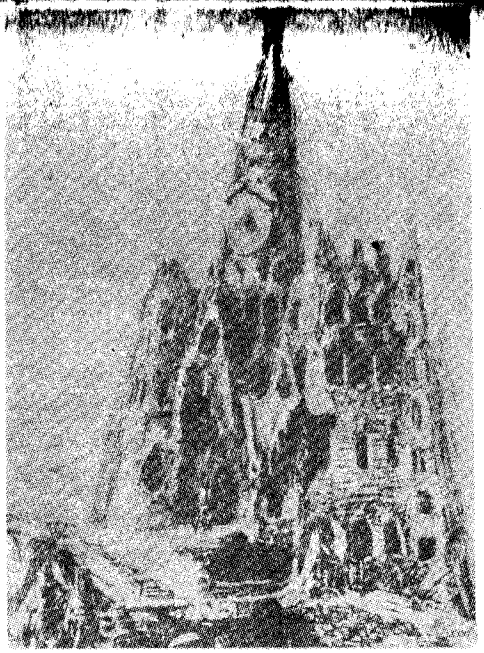
1.5.2 Perilaku Struktural

Banyak variasi yang mungkin mengenai cara struktur *funicular* digunakan dalam praktek nyata. Jelasnya, struktur ini dapat digunakan dalam bentuk murni seperti pelengkung atau kabel. Akan tetapi, umumnya perilaku dasar bentuk struktural yang berbeda dapat ditunjukkan dengan aksi *funicular.* Dengan demikian struktur-struktur tersebut dapat dipandang sebagai bentuk khusus dari struktur *funicular.* Transformasi dasar dari *funicular* sederhana ke bentuk struktural lainnya diilustrasikan pada Gambar 1-17.

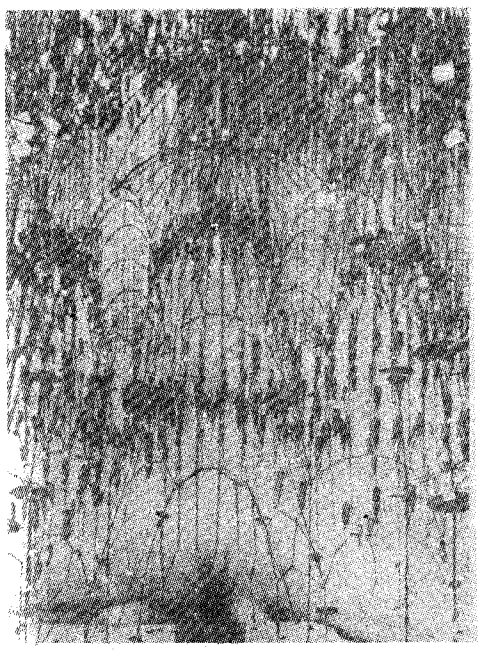
Gambar 1-17(a) memperlihatkan respons *funicular* dasar untuk beban terpusat dan beban terdistribusi. Gambar 1-17(b) memperlihatkan jenis gerakan yang dapat terjadi pada titik tumpuan apabila strukturnya tidak ditahan di titik-titik tersebut. *Funicular* tarik umumnya cenderung bergerak ke dalam dan ke bawah. Sistem tumpuan atau fondasi harus dapat memberikan gaya ke atas dan ke luar pada struktur di setiap ujung agar bentuknya dapat dipertahankan dan mencegahnya dari keruntuhan. Gaya-gaya ini berupa gaya reaksi [lihat Gambar 1-17(c)]. Perhatikan bahwa reaksi tersebut sama besar dan berlawanan arah dengan tarikan pada struktur. Dengan demikian gaya yang diberikan akan seimbang, yaitu sama besar dan berlawanan arah dengan gaya reaksi. *Funicular* tekan menghasilkan efek sebaliknya.



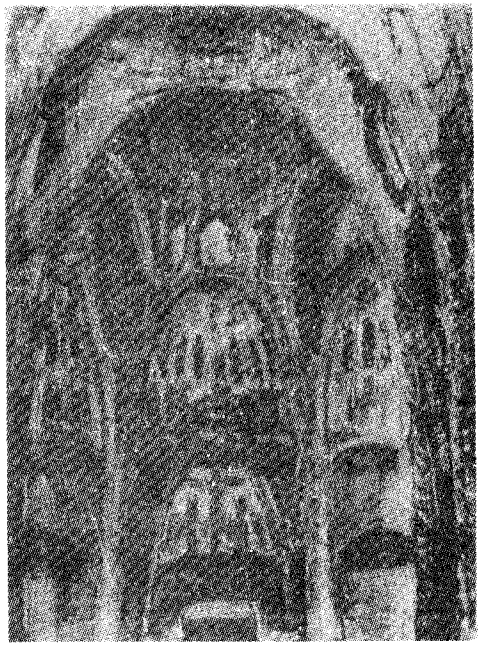
(a) Foto terbalik dari gereja Colonia Guel (oleh Antonio Gaudi) yang dimodelkan dengan struktur *funicular*



(b) Sketsa eksterior gereja yang didapat dari foto terbalik model tersebut

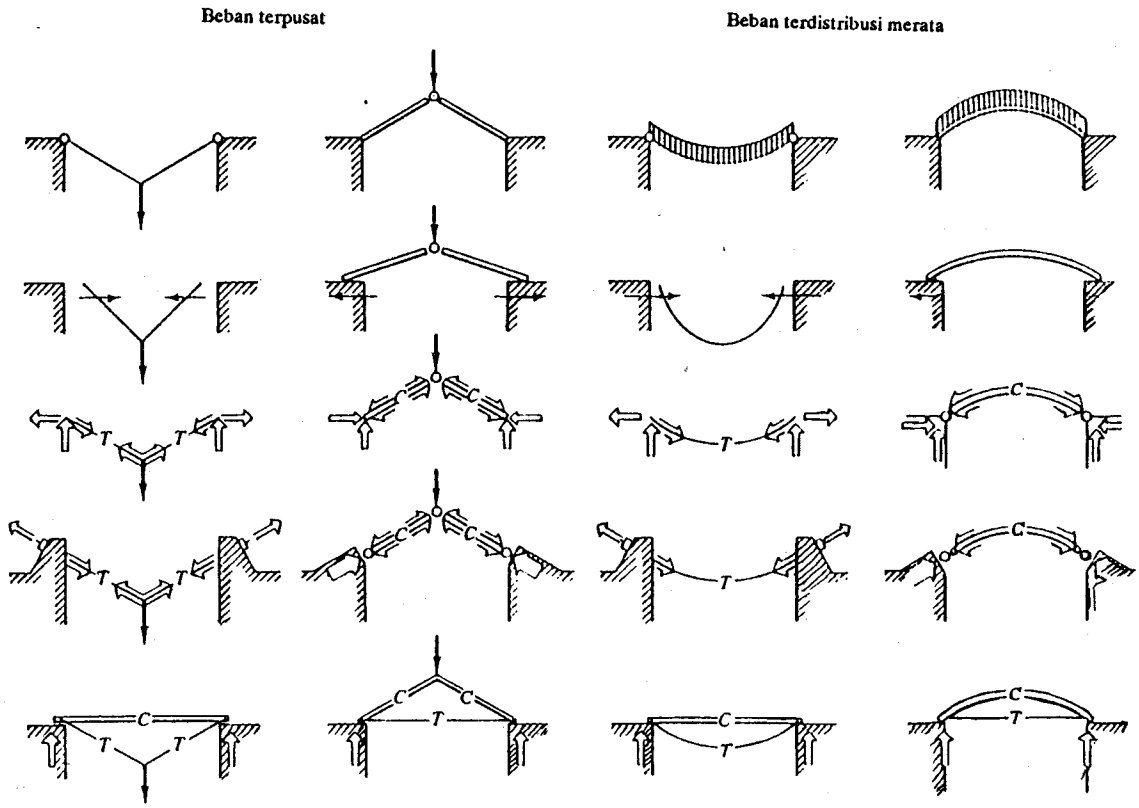


(c) Foto terbalik dari interior model

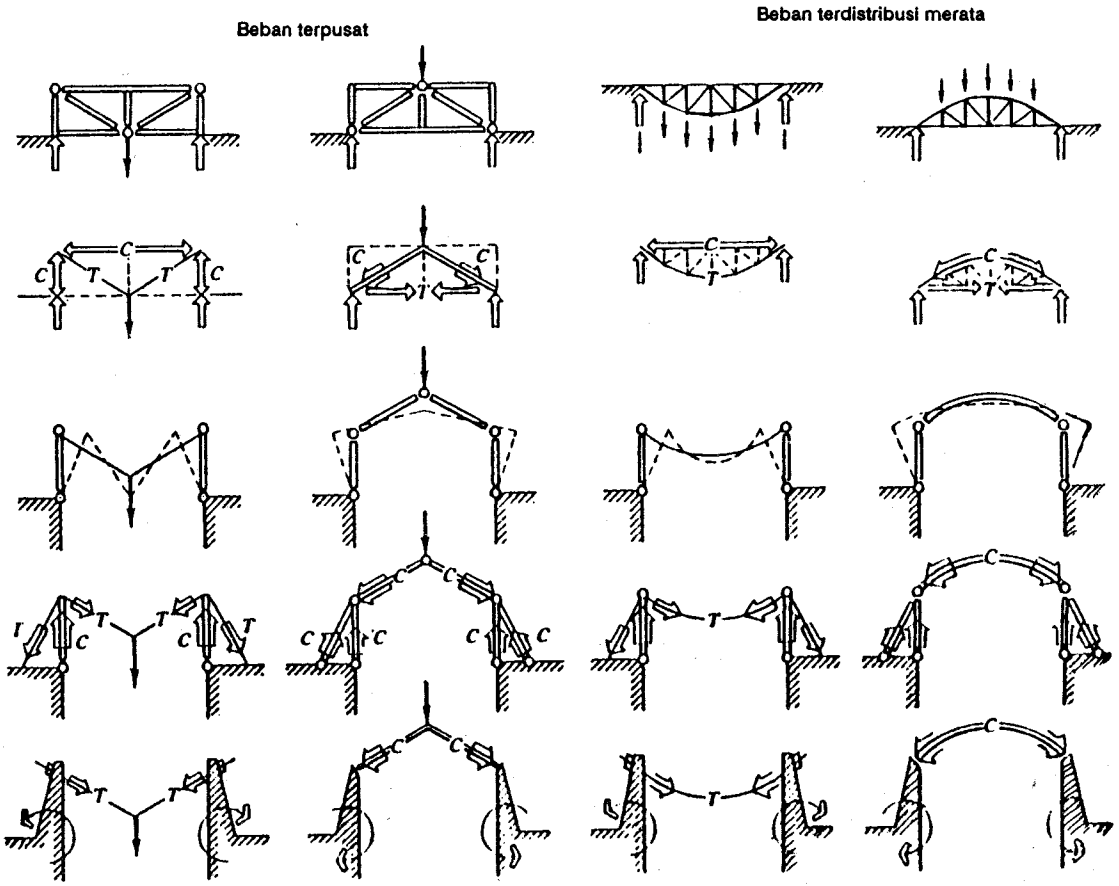


(d) Sketsa komposisi untuk interior gereja

GAMBAR 1-16 Penggunaan model *funicular* tiga dimensi. Berat gantungan dimodelkan dengan baik untuk menyatakan berat aktual yang ada.



GAMBAR 1-17 Struktur *funicular.* Transformasi yang diturunkan dari bentuk dasar.



Gambar 1-17 (Lanjutan)

Strukturnya cenderung bergerak ke luar dan ke bawah. Agar bentuk struktur dapat dipertahankan, harus ada gaya ke dalam dan ke atas terhadap struktur. Kombinasi gaya yang bekerja pada fundasi umumnya disebut *thrusts*. Fondasi harus mengandung *thrusts* tersebut.

Thrust akhir atau resultan pada struktur *funicular* dapat dibuktikan mempunyai arah garis singgung struktur di titik tumpuannya. Hal ini berdasarkan fakta bahwa karena lentur tidak ada pada struktur, maka semua gaya internal mempunyai arah aksial di seluruh panjang elemen struktur. Seperti terlihat pada Gambar 1-17(d), hal ini merupakan dasar penting dalam merencanakan fondasi struktur *funicular*.

Penggunaan fondasi masif *built-in* bukan merupakan satu-satunya cara menangani *thrust* pada struktur *funicular*. Sebagian dari *thrust* dapat diserap oleh struktur dengan menggunakan elemen struktur tambahan. Gambar 1-17(e) mengilustrasikan contoh beberapa struktur tersebut. Pada *funicular* tarik, kecenderungan kedua ujung adalah bergerak ke dalam, karena itu gerakan dapat dikendalakan dengan menggunakan elemen struktur linear yang mampu memikul gaya tekan di antara kedua titik tumpuan tersebut. Dengan demikian fundasinya dapat direncanakan hanya terhadap gaya vertikal. Hal yang sama juga berlaku pada struktur *funicular* tekan (misalnya pelengkung). Dengan memasang suatu elemen struktur di antara kedua tumpuannya, kecenderungan ke luaar dari struktur dapat dieliminasi sehingga fondasinya dapat dirancang untuk memikul gaya vertikal saja. Dengan demikian gaya tarik akan ada pada elemen struktur tambahan tersebut.

Ada beberapa hal menarik sehubungan dengan pembahasan di atas. Salah satunya adalah bahwa gaya yang harus dipikul oleh batang tarik atau tekan sama dengan komponen horizontal gaya total yang ada pada struktur di titik fondasi. Penggunaan *strut* ataupun *tie* tersebut tidak menghapuskan gaya yang terjadi, tetapi menanganinya dengan cara berbeda. Pada keadaan tertentu, memang diinginkan penggunaan batang tarik atau tekan sebsagai ganti dari fondasi masif untuk memikul *thrust* horizontal. Alasannya ialah karena merencanakan fondasi yang mampu memikul gaya horizontal tidak mudah dibandingkan dengan merencanakan fondasi terhadap beban vertikal saja. *Tie* (batang tarik), khususnya, merupakan cara yang relatif lebih mudah dalam memikul komponen horizontal *thrust* pada *funicular* tekan karena dapat berupa elemen struktur tarik panjang. *Struts* pada struktur kabel kurang diinginkan karena, apabila elemen tekan ini panjang, mempunyai perilaku yang disebut tekuk.

Ilustrasi lain pada Gambar 1-17 menunjukkan evolusi lebih lanjut dari bentuk dasar *funicular* ke bentuk lainnya. Kita tidak akan membahas transformasi ini lebih rinci, tetapi akan membicarakan observasi umumnya saja.

Pada konfigurasi segitiga yang terdiri atas elemen struktur linear (yaitu rangka batang), aksi utama struktur dapat pula disebut struktur *funicular*. Pada rangka batang di dalam Gambar 1-17(f) kiri, dengan mudah terlihat bahwa diagonal tengah berfungsi seperti kabel yang memikul beban terpusat, dan batang di tepi atas berfungsi sebagai elemen tekan. Dua batang vertikal tepi juga berupa batang tekan. Konfigurasi rangka batang lainnya dapat ditinjau dengan cara yang sama. Akan tetapi, analogi tersebut tidak selalu berlaku pada sembarang pola segitiga. Metode lebih lanjut mengenai rangka batang akan dibahas pada Bab 4.

Gambar 1-17(h), 1-17(i), dan 1-17(j) mengilustrasikan transformasi dari struktur *funicular* ke bentuk yang dapat dibesarkan menjadi suatu bentuk ruang. Tentu saja metode untuk menangani *thrust* horizontal yang ditimbulkan oleh struktur merupakan penentuan yang sulit. Susunan seperti terlihat pada Gambar 1-17(i), yang memikul beban terdistribusi merata pada pelengkung, tidak dapat secara mudah menggunakan elemen horizontal.

Dengan demikian, banyak variasi struktur yang berbeda, tetapi sesungguhnya saling berhubungan dalam hal perilaku struktur internal.

1.6 KLASIFIKASI LAIN

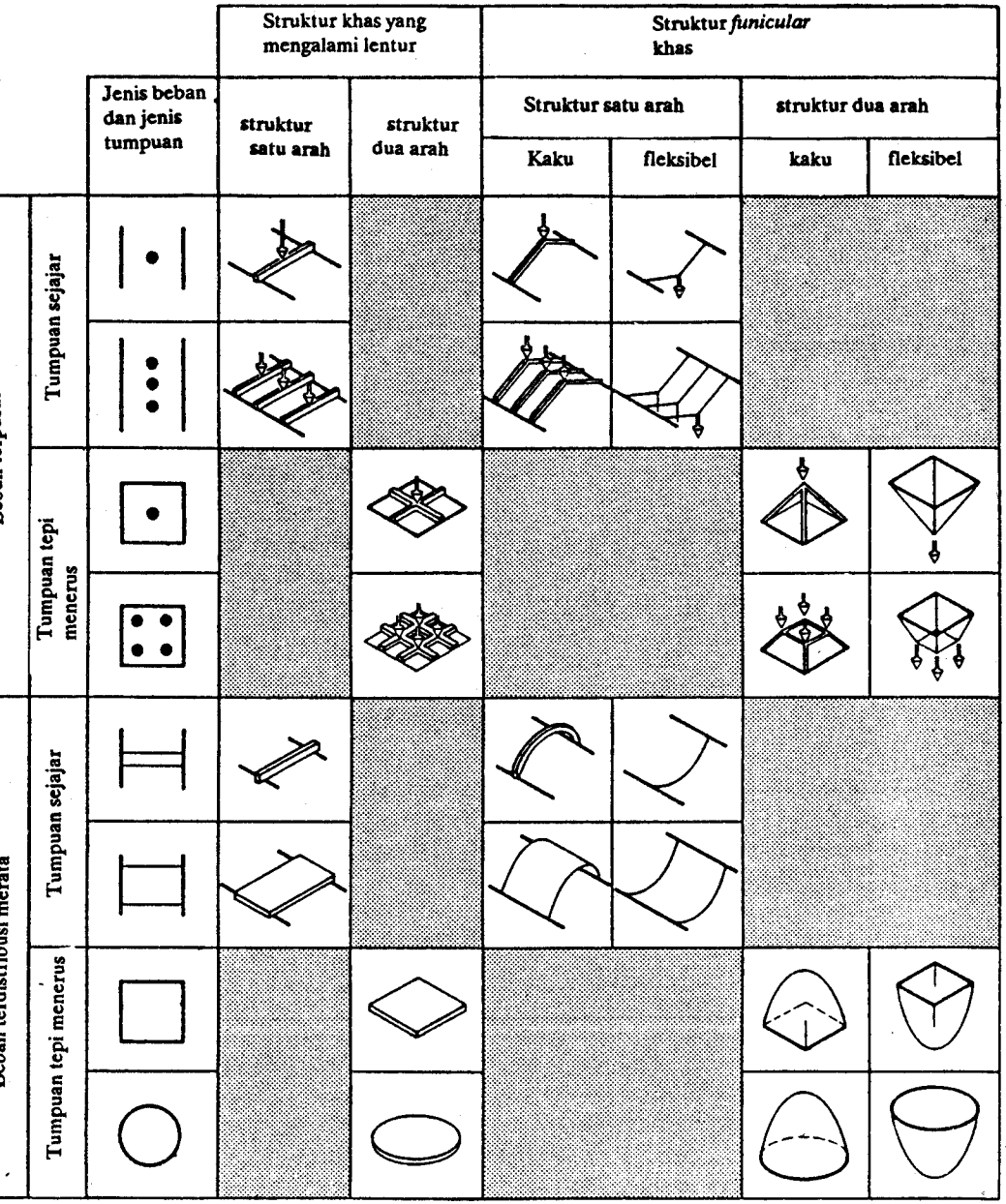
Rangkuman dari konsep-konsep yang telah dibahas mengenai klasifikasi struktur berdasarkan perilaku struktural internal terlihat pada Gambar 1-18. Perilaku beban dan kondisi batas tentu saja merupakan hal penting, tetapi tidak kita tinjau dalam mengklasifikasikan struktur seperti dibahs sebelum ini, juga pada Gambar 1-2. Ada perbedaan, tetapi juga persamaan, dalam membandingkan kedua skema.

Taraf detail yang diasosiasikan dengan skema klasifikasi pada Gambar 1-18 tentu saja terbatas. Sebagian besar daripadanya dapat digolongkan ke dalam transformasi masing-masing yang mungkin dari jenis umum yang telah dibahas dan diilustrasikan pada Gambar 1-17.

Kedua metode klasifikasi yang telah dibahas sejauh ini bukan merupakan cara satu-satunya dalam menggolongkan struktur. Dengan memilih kriteria lain untuk klasifikasi, ada skema luas yang dapat disusun. Ada di antaranya yang didasarkan atas kerumitan relatif pada keadaan gaya internal di dalam struktur. Sebagian besar struktur yang mempunyai bentang panjang, seperti pelengkung, mempunyai keadaan gaya internal yang lebih mudah diprediksi dibandingkan dengan elemen-elemen bentang pendek (misalnya sistem lantai *joist* kayu). Perbedaan ini adalah karena adanya aksi *funicular* dan lentur seperti telah dibahas sebelum ini.

Klasifikasi lain dapat dilakukan berdasarkan kemampuan pikul beban atau bentang. Faktor ini akan ditinjau lebih lanjut pada bagian lain buku ini. Cara lain yang sangat menarik dalam mengklasifikasikan struktur adalah berdasarkan tinjauan energi. Sekalipun topik ini belum dibahas, di sini disebutkan bahwa energi yang disimpan di dalam struktur sama dengan kerja yang diberikan kepadanya oleh beban. Peninjauan berdasarkan energi ini akan membagi struktur atas struktur berenergi rendah dan struktur berenergi tinggi.

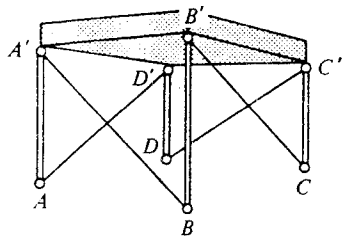
Klasifikasi-klasifikasi yang disebutkan di atas maupun klasifikasi lainnya digunakan sebagai cara untuk mempelajari berbagai variasi struktur dan hubungannya satu sama lain. Sekalipun demikian, sebagian besar hubungan penting didasarkan atas distribusi gaya yang ada di dalam struktur. Pada Bab 2 kita mulai dengan membahas pengertian gaya di dalam struktur dengan mula-mula meninjau karakteristik gaya secara umum. Bab-bab berikutnya akan membahas bagaimana ide pada Bab 2 diterapkan sebagai alat untuk menganalisis dan mendesain struktur.



GAMBAR 1-18 Klasifikasi struktur tipikal menurut aksi pikul beban dasarnya.

SOAL

1 – 1 Tinjaulah struktur seperti terlihat pada Gambar 1-19 yang terdiri atas plat berat kaku yang ditumpu oleh empat kolom. Anggap bahwa semua kolom tidak kaku. Jika elemen struktur diagonal *A'B, B'C, C'D,* dan *D'A* adalah batang-batang kaku yang mampu memikul tarik maupun tekan, apakah penggabungan tersebut membentuk sistem yang stabil? Mengapa? Apabila elemen struktur diagonal tersebut adalah kabel (bukan elemen kaku–, apakah susunan tersebut stabil? Mengapa? Jika tidak, dapatkah kabel lain ditambahkan untuk menjadikannya stabil? Di mana? Untuk semua ini, anggaplah bahwa struktur tersebut dibebani gaya horizontal di sembarang titik pada plat kaku dan dalam arah sembarang.



GAMBAR 1-19 Contoh

1 – 2. Tentukan bagaimana kapasitas pikul beban suatu kolom langsing panjang berubah terhadap panjangnya, misalnya, apabila panjangnya menjadi dua kali. Apa yang terjadi pada kapasitas pikul bebannya? Lakukanlah hal ini dengan mengukur gaya yang diperlukan oleh sekumpulan elemen tekan langsing yang panjangnya bervariasi, dan luas penampangnya sama ($\frac{1}{8}$ in x $\frac{1}{8}$ in). Berilah tumpuan sederhana di kedua ujungnya tanpa menahan rotasinya. Buatlah elemen tersebut sedemikian panjangnya karena, apabila terlalu pendek, sulit untuk menentukan beban kritisnya. Gambarlah kurva antara beban kritis *versus* panjang kolom.

1 – 3. Ambillah lembaran tipis dari karet dan berilah grid padanya. Berikanlah pada lembaran ini berbagai kondisi pembebanan dan jenis tumpuan. Minimal, lakukanlah hal berikut :

(a) Ambillah lembaran bujursangkar, yang ditumpu menerus pada tepinya, dan berilah tumpukan pasir di atasnya.
(b) Ulangi, tetapi tumpuannya hanya di pojok.
(c) Ulangi (a) dan (b) dengan menggunakan beban terpusat di tengah, tidak dengan pasir merata.

Perhatikan bagaimana permukaan tersebut berdeformasi pada setiap kasus dengan mempelajari bagaimana bagian elemen *grid* berdeformasi. Identifikasikan daerah yang paling berubah bentuknya pada setiap kasus (daerah bertegangan tinggi). Gambarlah sketsa bentuk terdefleksi.

1 – 4. Perhatikan Gambar 1-16 yang mengilustrasikan model berat penggantung yang digunakan oleh Gaudi dalam desain gereja Colonia Guell. Apakah model analisis yang sama untuk Gaudi lainnya berlaku? Apakah struktur tersebut benar-benar dibangun? Apakah gereja yang diilustrasikan merupakan pemikiran Gaudi mengenai struktur, ataukah ada contoh-contoh lainnya? Carilah literatur di perpustakaan.

BAB 2

PRINSIP-PRINSIP MEKANIKA

2.1 PENDAHULUAN

Mekanika adalah salah satu cabang ilmu pengetahuan terapan yang berhubungan dengan gaya dan gerak. Dasar ilmu ini adalah *keseimbangan,* yaitu kondisi yang ada apabila suatu sistem gaya bekerja pada benda. Sebutan *statika* digunakan untuk menunjukkan bagian dari mekanika yang khusus berhubungan dengan hubungan di antara gaya-gaya yang bekerja pada benda tegar *(rigid bodies)* yang berada dalam keseimbangan dan diam. Sebutan *dinamika* menunjukkan bagian mekanika yang berhubungan dengan benda tegar yang bergerak. Apabila gaya inersia juga diperhitungkan, maka benda yang bergerak juga dapat dipandang berada dalam keseimbangan. Bidang studi yang disebut *kekuatan bahan (strength of materials)* adalah perluasan dari mekanika, yang mencakup hubungan antara gaya-gaya yang bekerja pada benda atau gaya luar dengan gaya dalam yang ditimbulkannya. Mempelajari deformasi pada benda yang diakibatkan oleh gaya luar merupakan bagian utama dari bidang studi kekuatan bahan.

Pembatasan bidang studi yang tegas tadi menunjukkan perkembangan cara mempelajari bidang teknik secara umum. Dalam banyak kurikulum teknik, statika, dinamika, dan kekuatan bahan biasanya dipandang sebagai topik yang terpisah, tetapi masih dalam satu disiplin, yaitu mekanika. Akan tetapi, selama proses analisis dan desain struktur, seorang profesional dapat dengan bebas menggunakan ide dari ketiga dasar ilmu tadi dan menggunakannya sebagai alat secara terpadu. Bab-bab dalam Bagian II dari buku ini menggunakan pendekatan demikian. Akan tetapi, pada bagian awal ini kita masih menggunakan pembagian disiplin secara tradisional tersebut.

Bagian pertama dari bab ini memperkenalkan ide dasar tertentu mengenai statika. Bagian kedua akan berfokus pada elemen-elemen dasar kekuatan bahan.

Dinamika tidak termasuk ke dalam ruang lingkup buku ini. Penyajian berikutnya dimaksudkan untuk memberi tinjauan singkat mengenai dasar-dasar statika dan kekuatan bahan. Dengan demikian, topik-topik disajikan secara ringkas. Pembaca disarankan juga mempelajari buku lain mengenai topik-topik tertentu yang diuraikan secara lebih mendalam.[1]

2.2 GAYA DAN MOMEN

2.2.1 Gaya

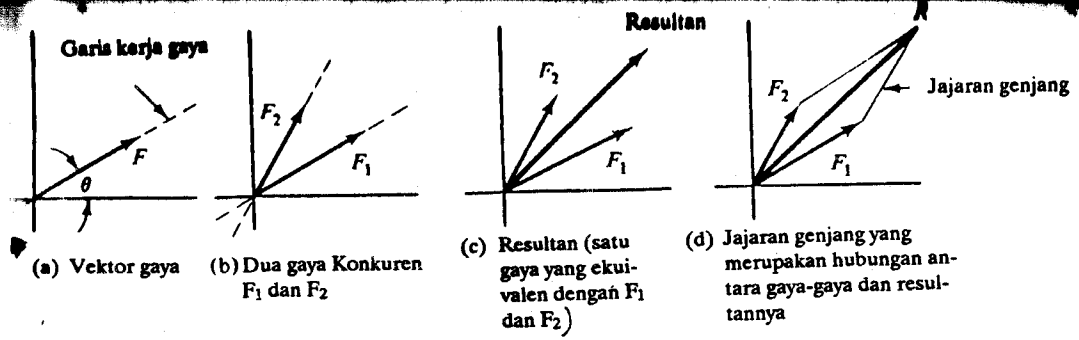
Dasar mekanika adalah konsep gaya-gaya dan komposisi serta resultan gaya. *Gaya* adalah interaksi antara benda-benda. Interaksi gaya mempunyai pengaruh terhadap bentuk atau gerak, atau keduanya, pada benda yang terlibat. Konsep dasar mengenai gaya tentu sudah cukup dikenal oleh pembaca dan sudah dapat dirasakan secara intuitif. Akan tetapi, ditinjau dari perspektif riwayatnya, pada mulanya tidak ada sesuatu pun yang jelas mengenai gaya dan karakteristik gaya yang dinyatakan dalam besar, arah, dan efeknya. Formulasi secara tepat mengenai konsep tersebut agak membutuhkan uraian yang cukup panjang dipandang dari derajat abstraksi yang dilibatkan. Pada abad pertengahan baru mulai jelas perbedaan antara gaya dengan berat dalam arti arahnya. Nama Jordanus de Nemore sering dihubungkan dengan timbulnya konsep-konsep ini. Bila gaya telah dipahami secara vektorial, maka dapat digunakan untuk mencari komponen gaya dan komposisi gaya resultannya. Ini dikembangkan oleh beberapa ilmuwan seperti Leonardo da Vinci, Steven, Roberval, dan Galilei. Masalah demikian sering disebut sebagai *masalah dasar di dalam statika,* yang akhirnya berhasil dipecahkan dengan tuntas oleh Varginon dan Newton.

2.2.2 Besaran Skalar dan Vektor

Dalam mempelajari mekanika, dapat dikatakan ada perbedaan yang jelas antara besaran skalar dan besaran vektor. Besaran *skalar* dapat dengan memadai dikarakteristikkan dengan besarnya saja, sedangkan besaran *vektor* harus dikarakteristikkan oleh besar dan arahnya. Gaya adalah besaran vektor. Setiap besaran vektor dapat dinyatakan dengan garis. Arah garis tersebut terhadap suatu sumbu-tetap menunjukkan arah besaran vektor tersebut. Panjang garis, apabila digambar dengan skala, menunjukkan besarnya [lihat gambar 2.1 (a)].

Sesungguhnya gaya tidak dapat secara lengkap dinyatakan hanya dengan besar dan arah karena titik tangkap bekerjanya disepanjang garis aksi sering kali merupakan sesuatu yang juga penting. *Garis kerja* suatu gaya adalah garis yang panjangnya tak tentu di mana terdapat vektor gaya tersebut. Karena hampir semua struktur yang dibahasa pada buku ini pada dasarnya adalah benda tegar, yang berdeformasi hanya

1. Sebagai contoh: Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston, *Vector Mechanics for Engineers: Statics,* McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.



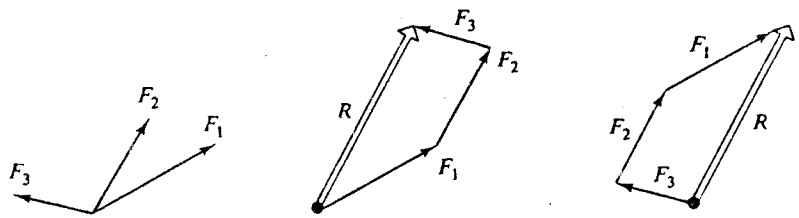
(a) Vektor gaya (b) Dua gaya Konkuren F_1 dan F_2 (c) Resultan (satu gaya yang ekuivalen dengan F_1 dan F_2) (d) Jajaran genjang yang merupakan hubungan antara gaya-gaya dan resultannya

GAMBAR 2.1 Vektor gaya, interaksi gaya, gaya-gaya resultan, dan jajaran genjang gaya.

sedikit (cukup kecil) apabila dibebani, maka dapat diasumsikan bahwa titik tangkap suatu gaya dapat dipindahkan ke titik lain yang terletak pada garis kerja tanpa mengubah efek translasional maupun rotasional dari gaya terhadap benda tersebut. Dengan demikian, gaya yang bekerja pada suatu benda tegar dapat dipandang bekerja *di mana saja* di sepanjang garis kerjanya.

2.2.3 Jajaran Genjang Gaya

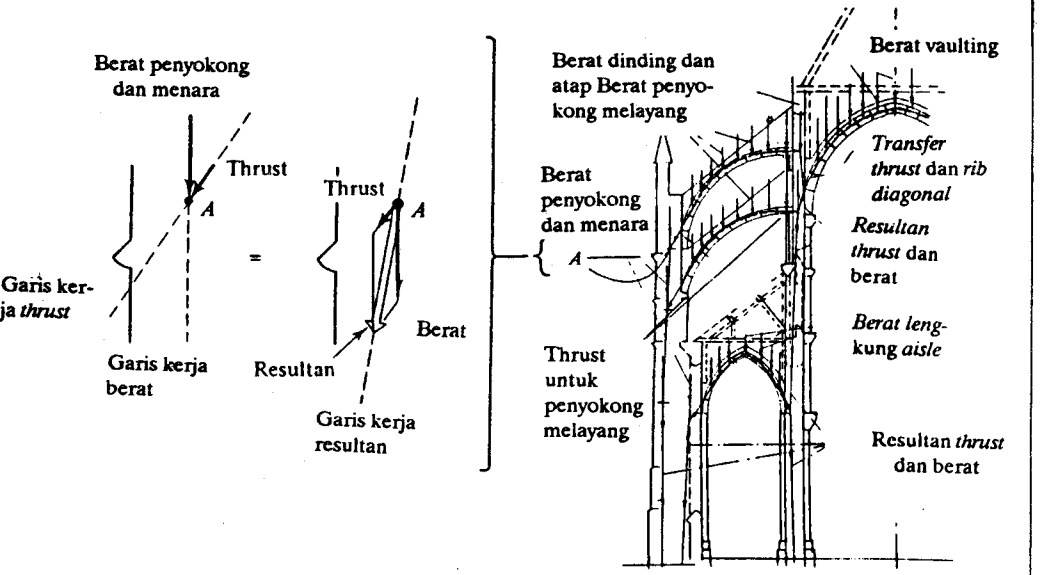
Salah satu yang terpenting di dalam mempelajari perilaku struktur ialah pengetahuan mengenai hasil interaksi beberapa vektor gaya yang bekerja pada suatu benda. Interaksi ini dapat dipelajari dengan menggunakan aturan perjumlahan vektor. Aturan ini didasarkan atas observasi eksperimental. Pada awalnya, metode pertama dalam perjumlahan vektor adalah berdasarkan *hukum jajaran genjang.* Pada vektor gaya, hal ini menyatakan bahwa apabila ada dua garis kerja gaya berpotongan, maka ada satu gaya, yang disebut *resultan,* yang ekuivalen dengan kedua gaya tersebut, yang dapat dinyatakan dengan diagonal jajaran genjang yang dibentuk oleh kedua vektor gaya tersebut [lihat Gambar 2.1 (b)–(d)]. Pada umumnya, kumpulan gaya yang lebih kompleks dapat dijadikan sederhana menjadi resultan gaya tanpa mengubah efek yang ditimbulkannya pada benda di mana gaya-gaya tersebut bekerja.



GAMBAR 2.2 Metode grafis untuk mencari gaya resultan untuk sistem gaya konkuren (berpotongan di satu titik).

Ada satu cara grafis untuk mencari gaya resultan dari beberapa vektor gaya yang garis kerjanya bertemu di satu titik seperti yang terlihat pada Gambar 22. Vektor-vektor itu masing-masing digambar berskala dan saling menyambung *(ujung* disambung dengan *pangkal)*. Urutan kombinasi tidak penting. Apabila gaya resultan tersebut tidak nol, maka tidak ada poligon gaya yang tertutup. Garis penutup merupakan gaya resultan dari semua vektor tersebut (yaitu garis yang berawal dari titik awal vektor pertama ke titik akhir vektor terakhir). Gaya resultan tersebut menutup poligon gaya. Cara umum ini berasal dari aturan jajaran genjang. Cara aljabar untuk mencari resultan beberapa gaya yang bekerja melalui satu titik dibahas pada Bab 2.2.6.

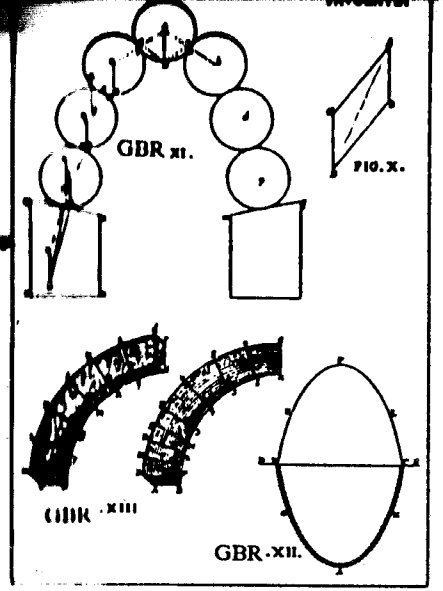
Meskipun secara konsep sangat mudah, pendekatan grafis untuk mencari gaya resultan dari suatu sistem gaya sangat berguna dalam analisis struktur. Pada awalnya, cara grafis ini merupakan cara yang banyak digunakan karena kemudahan penerapannya. Cara grafis banyak digunakan secara mendalam oleh para peneliti dalam usaha mereka untuk mempelajari perilaku struktur kompleks. Gambar 2.3 mengilustrasikan analisis dengan cara grafis. Gambar 2.4 mengilustrasikan *model bola* untuk suatu



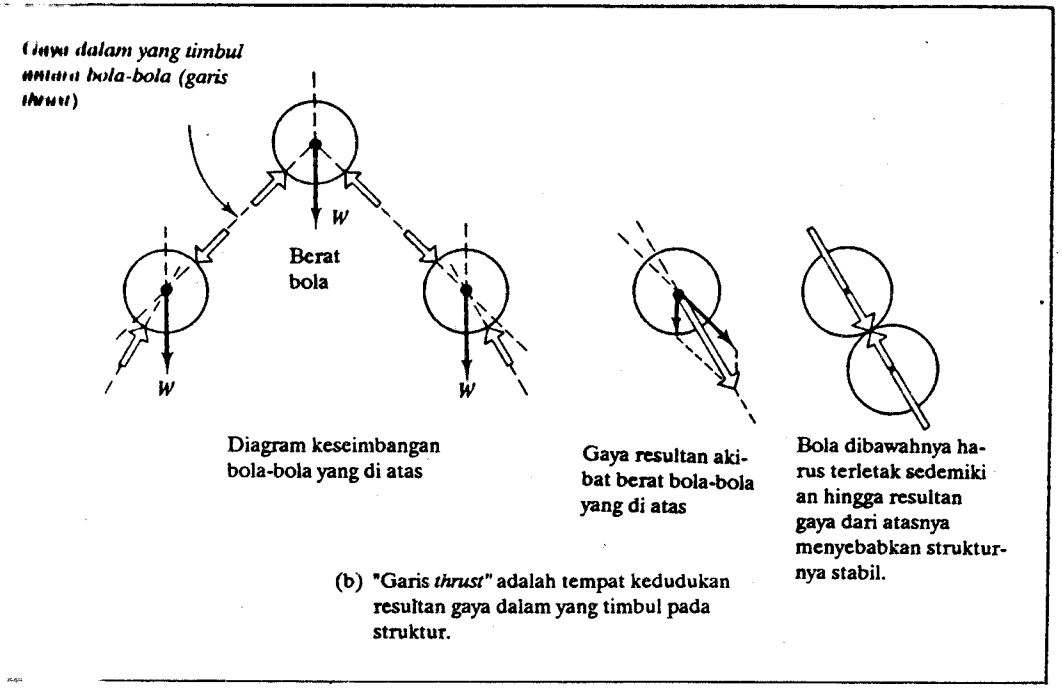
(a) Bagian atas dari penyokong

(b) Diagram yang memperlihatkan garis khas *thurst* pada penampang melintang

GAMBAR 2.3 Aplikasi metode grafis untuk menganalisis suatu struktur (Amiens). Beban mati penyangga vertikal mendorong penyangga melayang melalui bagian dari penyangga sendiri. Penyangga vertikal tersebut stabil dan tidak miring atau retak apabila resultan gaya melalui bagian tengah penyangga tersebut.



(a) Dari Poleni, *Memorie istoriche* della Gran Cupola del Tempio Vaicano, 1748: Bola-bola disusun sesuai dengan "garis *thrusts*".



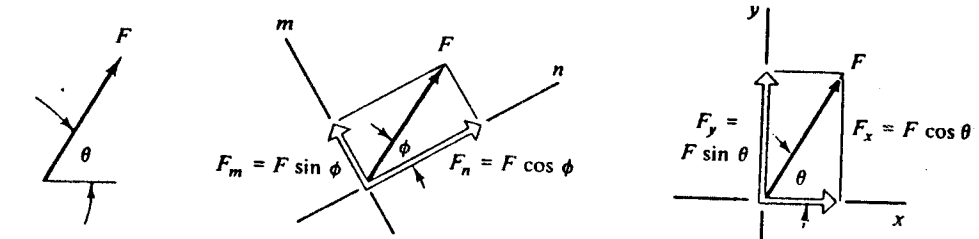
(b) "Garis *thrust*" adalah tempat kedudukan resultan gaya dalam yang timbul pada struktur.

GAMBAR 2.4 "Model Bola" pada pelengkung: apabila sekumpulan bola ditumpuk seperti tergambar, maka susunan yang diperoleh adalah stabil. Perhatikan bahwa bentuknya merupakan kebalikan dari rantai tergantung bebas yang terdiri atas bola serupa. Susunannya akan runtuh apabila beban atau posisi bole berubah.

pelengkung dengan menggunakan teknik grafis. Model tersebut, berdasarkan aturan jajaran genjang, masih merupakan cara yang baik dalam mempelajari pelengkung. Meskipun dalam buku ini analisis struktur-struktur tersebut dengan cara grafis tidak dibahas lebih lanjut, dapat dicatat di sini bahwa teknik grafis adalah cara yang sangat sederhana dan berdasarkan diskusi dalam bab ini. Teknik grafis sekarang tidak banyak digunakan lagi karena sudah semakin berkembangnya metode kuantitatif dan adanya alat hitung yang lebih maju seperti komputer. Akan tetapi, cara grafis masih merupakan cara yang cukup baik untuk digunakan dalam mempelajari penjalaran gaya di dalam struktur.

2.2.4 Resolusi dan Komposisi Gaya

Proses yang berasal langsung dari aturan jajaran genjang gaya adalah penguraian satu gaya menjadi dua atau lebih gaya yang membentuk sistem gaya yang ekuivalen dengan gaya semula. Proses ini biasanya disebut *penguraian gaya menjadi komponen-komponennya.* Banyaknya komponen yang dapat dibentuk dari sebuah gaya tak terbatas. (lihat Gambar 2.5). Dalam analisis struktur sering kali penguraian gaya ini



(a) Vektor gaya

(b) Komponen gaya pada sumbu *m-n*

(c) Komponen gaya pada sumbu *x-y*

GAMBAR 2.5 Uraian suatu gaya menjadi komponen-komponennya

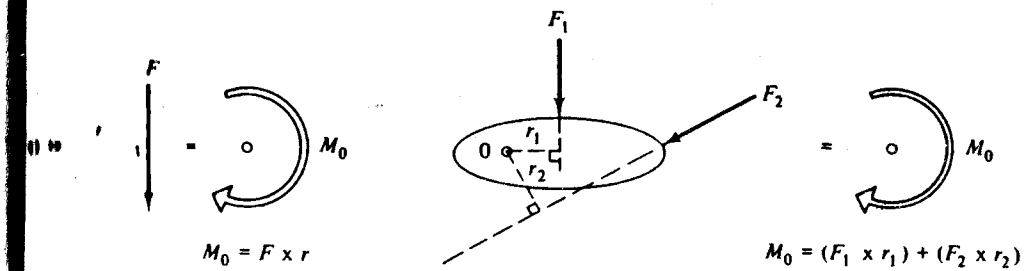
berguna, yaitu misalnya uraian menjadi komponen-komponen gaya yang saling tegaklurus. Komponen-komponen gaya ini dapat diperoleh dengan menggunakan fungsi trigonometri sederhana. Apabila suatu gaya F diuraikan menjadi komponen-komponen pada sumbu x dan y, maka komponen menjadi $F_x = F \cos \theta$ dan $F_y = F \sin \theta$. Proses sebaliknya, apabila ada dua gaya saling tegaklurus, F_x dan F_y, resultannya adalah F sebesar

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \qquad \text{dan} \qquad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right)$$

Perlu ditekankan di sini bahwa penggunaan sumbu kartesian hanya untuk kemudahan. Sudut siku hanya merupakan bentuk khusus dari suatu jajaran genjang. Gambar 2.5 mengilustrasikan beberapa uraian gaya. Tentu saja kita dapat juga mencari uraian gaya pada tiga dimensi.

2.2.5 Momen

Momen dari suatu Gaya. Setiap gaya yang bekerja pada suatu benda akan menyebabkan benda tersebut mengalami translasi dalam arah gaya itu. Bergantung pada titik tangkapnya, gaya itu juga dapat menyebabkan terjadinya rotasi yang disebut *momen* dari gaya tersebut (lihat gambar 2.6). Terhadap suatu titik atau suatu garis, besar putaran atau rotasi ini sama dengan hasil kali besar gaya dan jarak tegaklurus dari *garis kerja* gaya ke titik atau garis yang ditinjau. Momen M akibat gaya P terhadap titik 0 dapat dengan mudah disebut $M_0 = F \times r$ di mana r adalah jarak tegaklurus dari garis kerja gaya F ke titik 0. r sering disebut sebagai *lengan momen dari suatu gaya.* Momen mempunyai satuan gaya kali jarak (misalnya ft-lb, N–m).



Momen akibat satu gaya terhadap satu titik (momen = gaya x jarak)

(b) Momen akibat beberapa gaya terhadap satu titik

Gambar 2.6. Momen

Momen Akibat Banyak Gaya. Efek rotasional total yang diakibatkan oleh beberapa gaya terhadap satu titik atau garis yang sama adalah jumlah aljabar dari momen masing-masing gaya terhadap titik atau garis tersebut. Dengan demikian:

$$M_0 = (F_1 \times r_1) + (F_2 \times r_2) + \ldots + (F_n \times r_n)$$

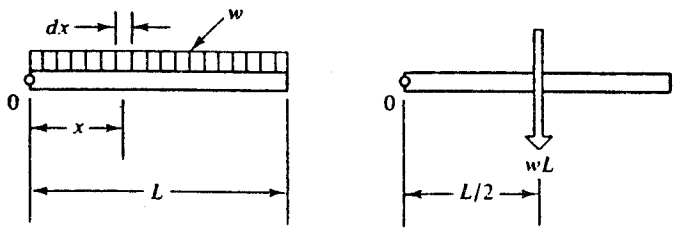
Momen terhadap suatu garis. Efek rotasional terhadap benda tegar (rigid body) yang diakibatkan oleh banyak gaya yang bekerja terhadap suatu titik atau garis, tetapi tidak sebidang, sama dengan yang diakibatkan apabila gaya-gaya tersebut sebidang.

Momen dari suatu Kopel. *Kopel* adalah sistem gaya yang terdiri atas dua gaya yang sama besar, tetapi berlawanan arah, dan garis kerjanya sejajar dan tidak terletak pada satu garis lurus (⇆). Kopel hanya mengakibatkan efek rotasional (tidak ada translasional) terhadap benda. Momen akibat kopel didapat dari hasil kali antara satu gaya dan jarak tegaklurus antara kedua gaya tersebut. Dapat dibuktikan bahwa momen akibat suatu kopel tidak bergantung pada titik referensi yang dipilih sebagai pusat momen. Besar efek rotasional yang dihasilkan oleh kopel terhadap suatu benda juga tidak bergantung pada titik tangkap kopel pada benda tersebut.

Momen Akibat Beban Terdistribusi. Dalam analisis struktur sering kali kita haru menghitung momen akibat suatu bentuk beban terdistribusi yang bekerja pada suat benda. Tinjaulah beban terdistribusi yang besarnya konstan sebesar w lb/ft ata kN/m yang diilustrasikan dalam Gambar 2.7. Suatu bagian kecil dari beban tersebu $w\,dx$, mengakibatkan momen terhadap titik 0 sebesar $(x)\,w\,dx$. Dengan demikian momen total akibat seluruh beban terhadap titik 0 adalah:

$$M_0 = \int_0^L wx\,dx = \frac{wL^2}{2}$$

Perhatikan bahwa momen yang sama juga diperoleh dengan mengubah beban terdis busi tersebut dengan satu beban yang ekuivalen dengan beban tadi, yang bekerja pa pusat massa beban terdistribusi. Untuk kasus di atas, beban terpusat ekuivalenny adalah wL [yaitu w(lb/ft) x L(ft)] = wL lb]. yang bekerja di $L/2$. Momen akib sistem gaya ekuivalen ini adalah $M_0 = (wL)\,(L/2) = wL^2/2$ yang sama dengan mom yang diperoleh dari $M_0 = \int^L wx\,dx$. Teknik pemodelan beban terdistribusi menja terpusat sangat berguna dalam mencari reaksi pada struktur kompleks dan sering gunakan dalam analisis struktur.



(a) Beban terdistribusi merata

$$M_0 = \int_0^L wx\,dx = \frac{wL^2}{2}.$$

(b) Model ini menghasilkan momen rotasi yang sama terhadap titik 0 dengan yang diakibatkan oleh beban terdistribusi merata pada Gambar (a).

GAMBAR 2.7. Momen akibat beban terdistribusi.

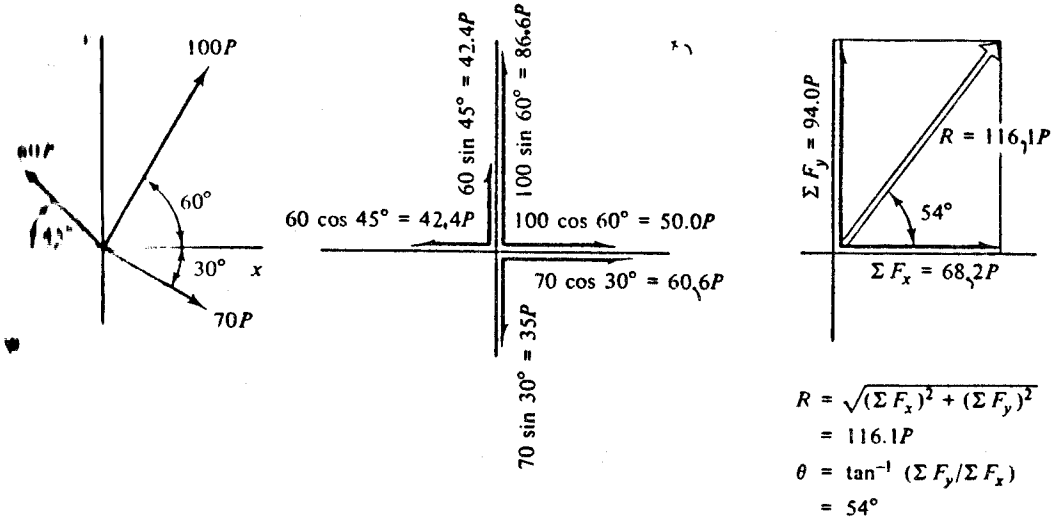
2.2.6 Sistem Ekuivalen secara Statis

Dalam pembahasan sebelum ini secara implisit telah kita gunakan arti ekuival secara statis. Aapabila suatu sistem gaya yang bekerja pada suatu benda dapat diga dengan sistem gaya lain yang bekerja pada benda tersebut, tanpa mengubah ef translasional maupun rotasional pada benda tersebut, maka kedua sistem gaya i disebut *ekuivalen secara statis (statically equivalent).* Sebagai contoh, gaya result adalah ekuivalen secara statis dengan sistem gaya dari mana resultan tersebut dipe oleh. Diagram-diagram dalam Gambar 2.8 mengilustrasikan proses mencari ga resultan tunggal yang ekuivalen secara statis dengan sekumpulan gaya kongkuren d koplanar. *Gaya-gaya kongkuren* bekerja melalui satu titik dan tidak menyebabk efek rotasional terhadap titik tersebut (lengan momennya nol). Proses tersebut ad lah penguraian setiap gaya ke dalam komponen-komponennya (F_x dan F_y dari seti

gaya), dan secara aljabar menjumlahkan setiap komponen dalam masing-masing arah. Dengan demikian gaya resultannya adalah $R = \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2}$, orientasinya adalah θ_x = arc tan $(\Sigma F_y/\Sigma F_x)$.

Karena komponen-komponen gaya tersebut ekuivalen dengan gaya itu sendiri, maka momen total yang dihasilkan oleh komponen-komponen gaya terhadap suatu titik sama dengan momen yang dihasilkan oleh gaya itu sendiri terhadap titik yang sama [yaitu $M = F(r) = F_x(r_x) + F_y(r_y)$].

Metode yang baru saja dibahas ini dapat digunakan sebagai alat bantu dalam mencari resultan dari sistem gaya tak-kongkuren (yaitu gaya-gaya yang tidak berpotongan di satu titik). Secara umum, satu gaya resultan dari sistem gaya tak-kongkuren adalah $R = \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2}$, orientasinya adalah θ_x = arc tan $(\Sigma F_y/\Sigma F_x)$, serta lokasinya adalah $a_0 = \Sigma M_0/R$ *di mana* ΣM_0 adalah jumlah dari momen akibat gaya-gaya tersebut terhadap titik 0 dan a_0 adalah lengan momen gaya R terhadap titik 0 (lihat gambar 2.9).



Gaya-gaya koplanar

(b) Komponen-komponen gaya pada sumbu x dan y (F_x dan F_y)

$R = \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2}$
$= 116.1P$
$\theta = \tan^{-1}(\Sigma F_y/\Sigma F_x)$
$= 54°$

(c) Gaya resultan

GAMBAR 2.8 Sistem gaya kongkuren – gaya-gaya seimbang dan resultan.

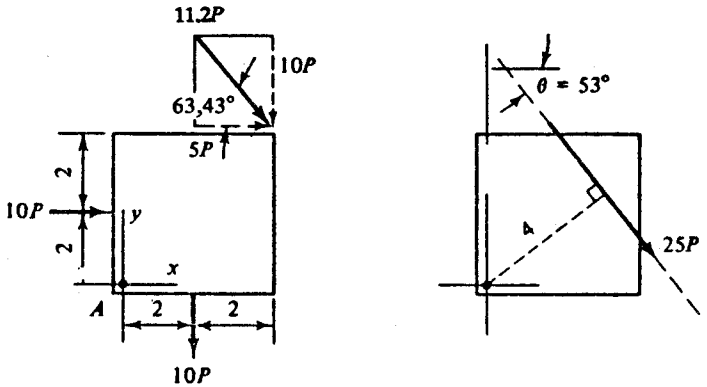
2.3 KESEIMBANGAN

2.3.1 Keseimbangan suatu Partikel

Suatu benda berada dalam keseimbangan apabila sistem gaya yang bekerja pada benda tersebut tidak menyebabkan translasi maupun rotasi pada benda tersebut.

Keseimbangan akan ada dari sistem gaya kongkuren yang bekerja pada titik atau partikel apabila resultan sistem gaya kongkuren tersebut sama dengan nol. Suatu sistem gaya kongkuren yang mempunyai gaya resultan dapat dijadikan seimbang dengan memberikan suatu gaya (yang disebut *penyeimbang)* yang sama besar dan berlawanan arah dengan resultan tersebut (lihat Gambar 2.10).

Resultan dari sistem gaya kongkuren dapat diperoleh dengan meninjau komponen-komponen gaya dan menggunakan $R = \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2}$. Apabila sistem yang tersebut dalam keadaan seimbang, maka resultan ini sama dengan nol *(R* = 0), jadi haruslah $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$. Dengan demikian, jumlah aljabar semua komponen gaya yang bekerja pada partikel dalam arah x maupun y haruslah sama dengan nol. x dan y tidak selalu horizontal dan vertikal, tetapi sistem sumbu yang saling tegak-lurus, bagaimana pun orientasinya.



(a) Gaya koplanar tak sejajar

(b Gaya yang ekuivalen secara statis

Gaya	F_x	F_y	Momen F_x terhadap A	Momen F_y terhadap A
10	10 *P*	0	(2 x 10) = 20 *P*	0
10	0	10 *P*	0	(2 x 10) = 20 *P*
11.2	5 *P*	10 *P*	(4 x 5) = 20 *P*	(4 x 10) = 40 *P*

$\Sigma F_x = 15\,P \quad \Sigma F_y = 20\,P \quad \Sigma M_A = 40\,P + 60\,P = 100\,P$

$$R = \sqrt{(\Sigma F_x) + (\Sigma F_y)} = 25\,P \qquad a = \frac{\Sigma M}{R}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\Sigma F_y}{\Sigma F_x} = 53° \qquad = \frac{100}{25} = 4$$

GAMBAR 2.9 Gaya-gaya tidak sejajar-mencari gaya yang ekuivalen secara statik.

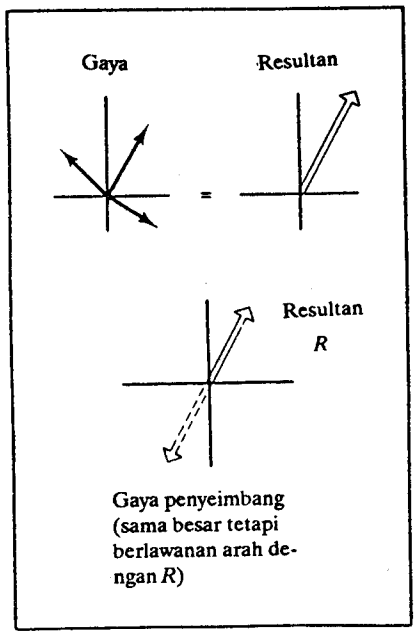
Secara lebih umum lagi, $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$ dan $\Sigma F_z = 0$ adalah syarat yang perlu dan cukup untuk menjamin keseimbangan pada sistem gaya yang kongkuren. Suatu sistem gaya yang memenuhi kondisi tersebut tidak akan menyebabkan partikel mengalami translasi (rotasi bukan merupakan masalah karena semua gaya bekerja melalui satu titik yang sama pada sistem gaya konkuren).

2.3.2 Keseimbangan Benda Tegar

Kondisi Keseimbangan Umum. Apabila sistem gaya tak-konkuren bekerja pada suatu benda tegar, maka akan ada potensial untuk mengalami translasi dan rotasi. Agar benda tegar mengalami keseimbangan, keduanya harus tidak ada. Untuk mencegah translasi, ini mengandung arti yang sama dengan pada sistem gaya konkuren, yaitu resultan sistem gaya tersebut haruslah sama dengan nol. Untuk mencegah rotasi, maka haruslah jumlah momen yang diakibatkan oleh semua gaya sama dengan nol. Dengan demikian, kondisi keseimbangan benda tegar adalah:

$$\Sigma F_x = 0 \qquad \Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma F_z = 0$$
$$\Sigma M_x = 0 \qquad \Sigma M_y = 0 \qquad \Sigma M_z = 0$$

Apabila bekerja dengan sistem gaya umum, perjanjian tanda tidak merupakan masalah. Untuk maksud analisis dan desain struktural, lebih mudah apabila



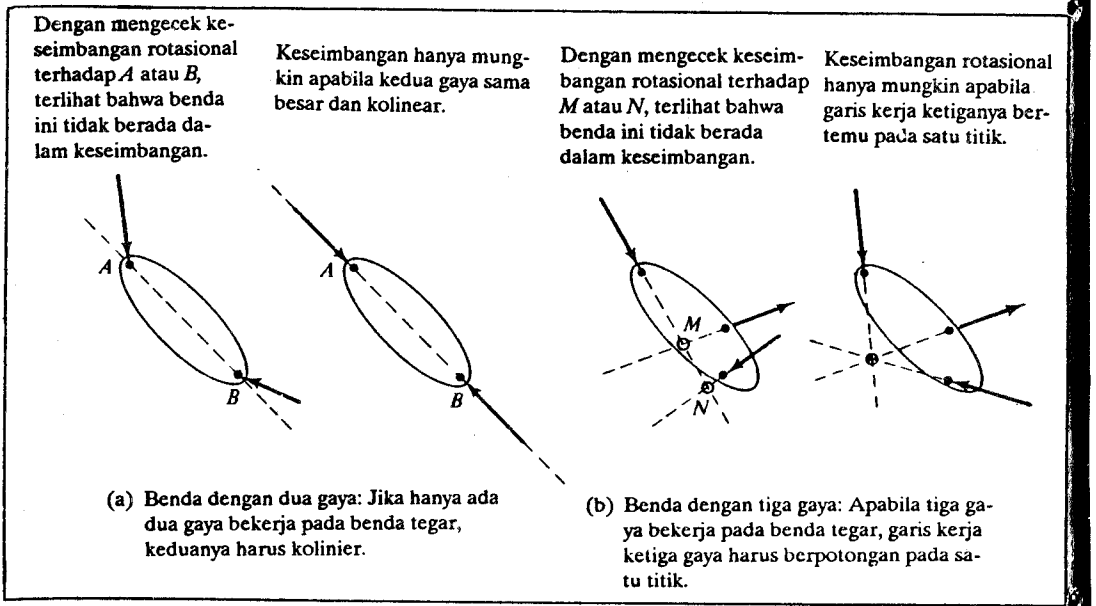
GAMBAR 2.10 Hubungan antara gaya-gaya, gaya resultan, dan gaya penyeimbang.

bekerja dengan menggunakan gaya-gaya atau komponennya pada sumbu x dan y. Pada buku ini, gaya-gaya yang bekerja pada arah x dan y positif akan dipandang positif. Momen yang menyebabkan rotasi berarah berlawanan jarum jam akan dipandang positif. Perjanjian tanda ini hanyalah untuk perhitungan keseimbangan. Perjanjian tanda lainnya untuk gaya dan momen internal pada struktur yang ditinjau akan didefinisikan secara tersendiri.

Sebelum meninjau aplikasi umum pernyataan keseimbangan tadi, kita tinjau dahulu dua kasus khusus (batang-batang dua gaya dan batang-batang tiga gaya).

Sistem Dua Gaya. Apabila suatu benda tegar dibebani dua gaya, kedua gaya tersebut tidak dapat mempunyai besar maupun garis kerja yang sembarang apabila benda tersebut harus berada dalam keseimbangan. Tinjau benda yang terlihat pada Gambar 2.11. Dengan menjumlahkan momen-momen terhadap titik A, terlihat bahwa tidak mungkin struktur tersebut mengalami keseimbangan rotasi *kecuali* apabila garis kerja gaya B itu melalui titik A. Dengan cara serupa, garis kerja gaya pada A harus melalui titik B apabila strukturnya harus berada dalam keseimbangan rotasi terhadap titik B. Dengan demikian, kedua gaya tersebut *harus* kolinear. Selain itu, keduanya harus sama besar, tetapi berlawanan arah. Hasil ini sangat penting, khususnya dalam analisis rangka batang *(trusses)*.

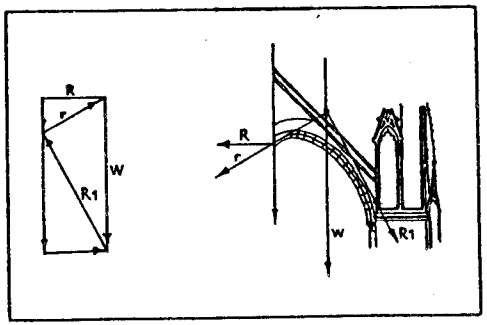
Sistem Tiga Gaya. Seperti pada benda-benda dua gaya, tiga gaya yang bekerja pada suatu benda tidak dapat mempunyai besar maupun arah yang sembarang apabila benda tersebut harus berada dalam keadaan seimbang. Hal ini akan jelas dengan melihat Gambar 2.11. Agar benda berada dalam keseimbangan rotasional, garis kerja ketiga gaya harus melalui satu titik.



GAMBAR 2.11 Benda dengan dua dan tiga gaya.

Gambar 2.12 memperlihatkan analisis struktur *gothic* yang mengilustrasikan prinsip bahwa garis kerja sistem tiga gaya harus melalui satu titik.

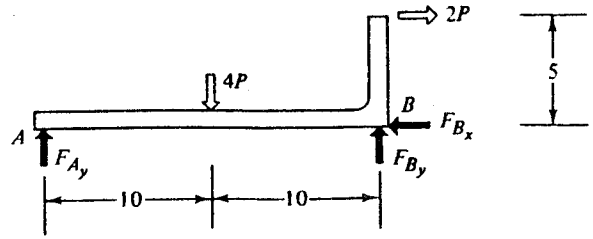
Sistem Gaya Umum. Apabila kita tinjau sistem gaya yang lebih kompleks lagi, jelaslah bahwa harus ada hubungan antara gaya-gaya tersebut, dan garis kerjanya sedemikian rupa sehingga terpenuhi keadaan $\Sigma F = 0$ dan $\Sigma M = 0$ agar terpenuhi kondisi keseimbangan.



GAMBAR 2.12 Penerapan cara grafis untuk menganalisis struktur gothic. Berat elemen struktur dan reaksinya harus membentuk sistem tiga gaya. Dengan demikian semua gaya haruslah bertemu pada satu titik.

CONTOH

Tentukan gaya-gaya F_{Ay}, F_{By}, dan F_{Bx} yang diperlukan agar benda tegar pada Gambar 2.13 berada dalam keseimbangan.



GAMBAR 2.13 Contoh

Solusi:

Keseimbangan gaya dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0$:

$$F_{A_y} + F_{B_y} - 4P = 0$$

Persamaan ini tidak dapat dipecahkan untuk memperoleh F_{Ay} maupun F_{By} karena hanya ada satu persamaan dengan dua anu. Langkah berikut adalah memperoleh

satu persamaan independen lainnya yang melibatkan kedua anu, yaitu $\Sigma M = 0$. Persamaan terakhir ini merupakan persamaan yang independen.

Titik sembarang dapat dipilih sebagai pusat momen. Akan tetapi, dengan memilih pusat momen yang berlokasi di garis kerja salah satu gaya, solusinya akan lebih cepat diperleh.

Keseimbangan momen terhadap titik A: $\Sigma M_A = 0$:

$$(F_{A_y} \times 0) - (4P \times 10) + (F_{B_y} \times 20) + (F_{B_x} \times 0) - (2P \times 5) = 0$$

atau

$$F_{B_y} = 2.5P \uparrow$$

Dari $\Sigma F_y = 0$:

$$F_{A_y} + 2.5P - 4P = 0 \quad \text{or} \quad F_{A_y} = 1.5P \uparrow$$

Keseimbangan gaya dalam arah horizontal: $\Sigma F_x = 0$:

$$-F_{B_x} + 2P = 0 \quad \text{or} \quad F_{B_x} = 2P \leftarrow$$

Kontrol:
Apabila semua gaya yang dicari sudah diperoleh, hasil-hasilnya dapat diperoleh dengan memilih pusat momen lain dan menulis persamaan keseimbangan momennya. Sebagai contoh, persamaan keseimbangan momen terhadap titik *B*:

$$-(1.5P \times 20) + (4P \times 10) + (2.5P \times 0) + (2P \times 0) - (2P \times 5) = 0$$

atau

$$0 = 0$$

Dengan demikian, benda tegar tersebut berada dalam keseimbangan.

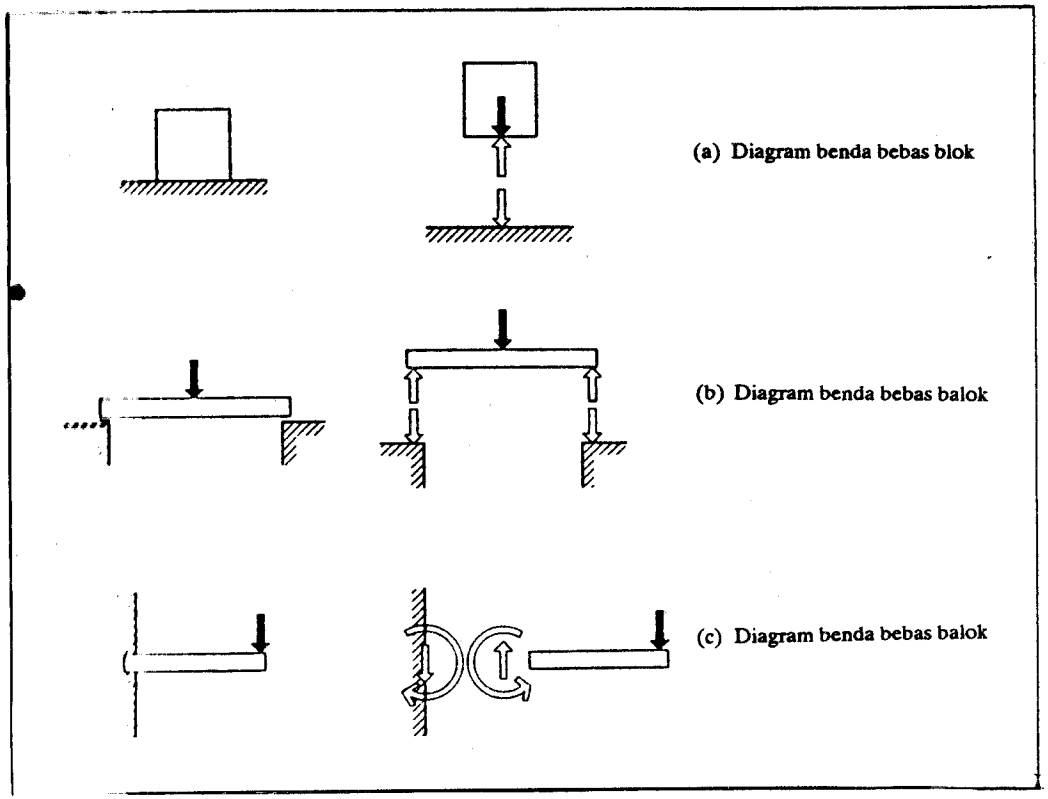
2.4 MOMEN DAN GAYA INTERNAL DAN EKSTERNAL

Hingga saat ini. kita belum membedakan jenis momen dan gaya yang bekerja pada suatu benda. Bagaimana pun, momen dan gaya dapat berupa internal atau eksternal. Gaya atau momen yang bekerja pada suatu struktur disebut *eksternal* (misalnya berat sendiri struktur). Gaya-gaya dan momen yang timbul di dalam struktur sebagai respons terhadap gaya eksternal yang ada disebut *internal* (misalnya gaya terik di dalam batang).

2.4.1 Sistem Gaya Eksternal

Gaya Reaktif dan Gaya yang Bekerja. Gaya dan momen yang bekerja pada suatu benda tegar dapat dibagi ke dalam dua jenis utama, yaitu yang bekerja dan yang *reaktif*. Dalam banyak *penggunaan* istilah teknik, *gaya yang bekerja* adalah gaya yang bekerja langsung pada struktur (misalnya salju). *Gaya reaktif* adalah yang timbul akibat adanya aksi suatu benda ke benda lain, dan dengan demikian umumnya terjadi pada hubungan atau tumpuan. Adanya gaya-gaya reaktif berasal dari hukum *Newton ketiga* yang secara umum menyatakan bahwa apabila ada suatu aksi maka akan ada reaksi yang besarnya sama dan berarah berlawanan. Secara lebih tepat lagi, hukum ini menyatakan bahwa apabila suatu benda memberikan gaya pada benda lain, maka benda kedua akan selalu memberikan gaya yang sama besar dan berlawanan arah terhadap benda pertama. Dalam Gambar 2.12(b), gaya-gaya pada balok menyebabkan gaya-gaya yang berarah ke bawah pada fondasi sehingga ada gaya reaksi yang berarah ke atas. Dengan demikian, ada sepasang gaya aksi dan reaksi yang terdapat pada pertemuan balok dengan fondasi. Dalam banyak hal, momen juga dapat merupakan bagian dari sistem aksi-reaksi [lihat Gambar 2.14(c)].

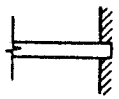
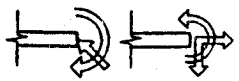
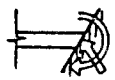
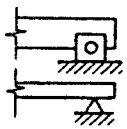
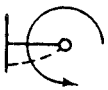
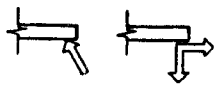
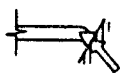
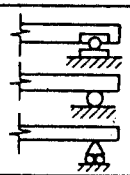
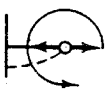
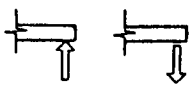
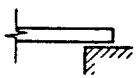
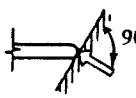
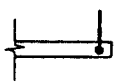
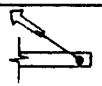
Diagram dalam Gambar 2.14, yang memperlihatkan sistem kompleks gaya-gaya aksi dan reaksi yang bekerja pada suatu benda, disebut *diagram benda bebas (free-body diagram).*



GAMBAR 2.14 Diagram (atau keseimbangan) benda bebas dan reaksi.

Jika sebuah benda berada dalam keadaan keseimbangan, jelaslah bahwa syarat keseimbangan benda tegar seperti yang telah disebutkan di atas harus terpenuhi. Besar dan arah gaya reaktif yang terjadi harus sedemikian rupa sehingga memenuhi syarat keseimbangan, jadi sangat bergantung pada karakteristik bebannya. Keseluruhan sistem gaya yang bekerja dan reaksi pada benda (seperti yang ditunjukkan dengan diagram benda bebas) harus berada dalam keadaan keseimbangan. Diagram benda bebas sering disebut juga sebagai *diagram keseimbangan.* Menggambar diagram keseimbangan dan mencari reaksi untuk suatu struktur yang dibebani merupakan langkah pertama dalam keseluruhan analisis struktur.

Kondisi Tumpuan. Sifat gaya-gaya reaksi yang timbul pada benda yang dibebani bergantung pada bagaimana benda tersebut ditumpu atau dihubungkan dengan benda lain. Gambar 2.15 mengilustrasikan hubungan antara jenis kondisi tumpuan yang ada dan jenis gaya-gaya reaksi yang timbul. Beberapa jenis kondisi tumpuan yang utama diperlihatkan secara khusus, sedangkan jenis yang lainnya mungkin saja terjadi. Di antara yang terpenting adalah tumpuan sendi, tumpuan rol, dan tumpuan jepit. Pada *tumpuan sendi,* titiknya membolehkan elemen strukturnya berotasi secara bebas, tetapi tidak dapat bertranslasi ke arah mana pun. Dengan demikian

Jenis tumpuan	Simbol	Jenis rotasi dan translasi yang dapat terjadi pada tumpuan	Jenis gaya yang dapat timbul pada tumpuan	Jenis gaya yang dapat timbul apabila tumpuannya miring
Tumpuan jepit				
Tumpuan sendi				
Tumpuan rol				90°
Tumpuan sederhana				 90°
Tumpuan kabel				

GAMBAR 2.15 Jenis kondisi tumpuan: model-model idealisasi

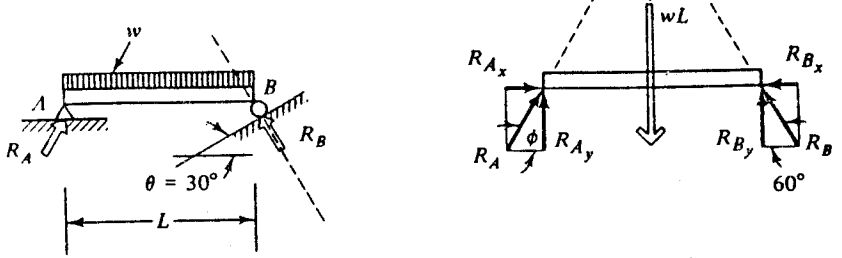
titik tumpu tersebut tidak dapat memberikan tahanan momen, tetapi dapat memberi tahanan gaya pada arah mana pun. *Tumpuan rol* juga dapat berotasi dengan bebas dan dapat menahan translasi, tetapi hanya pada arah yang tegak-lurus bidang terhadap tumpuan (baik mendekati maupun menjauhi tumpuan). Tumpuan rol ini tidak memberikan tahanan gaya dalam arah sejajar dengan bidang tumpuan. *Tumpuan jepit* dapat menahan rotasi maupun translasi dalam arah mana pun. Dengan demikian, tumpuan ini dapat memberikan tahanan momen dan gaya dalam arah sembarang. Jenis tumpuan lain misalnya *tumpuan kabel* dan *tumpuan sederhana.* Tumpuan-tumpuan ini serupa dengan tumpuan rol kecuali dalam hal tumpuan ini hanya dapat memberikan tahanan dalam satu arah. Semua tumpuan tadi tentu saja merupakan idealisasi dari keadaan sesungguhnya. Hubungan antara keadaan idealisasi dengan keadaan aktual yang ada pada struktur gedung dibahas pada Bab 3.3.2.

Agar suatu struktur stabil, harus ada sejumlah tertentu tahanan gaya (dan atau momen) yang diberikan oleh tumpuannya. Untuk balok sederhana (simple beam) yang dibebani dengan gaya-gaya vertikal maupun horizontal harus ada tiga gaya (hal ini sesuai dengan fakta bahwa pada struktur ini harus terpenuhi kondisi seimbang: $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M = 0$). Salah satu cara adalah dengan menggunakan tumpuan jepit. Cara lainnya adalah dengan menggunakan tumpuan sendi pada salah satu ujung dan tumpuan rol pada tumpuan lainnya. Tentu saja kita dapat menggunakan derajat tahanan gaya yang lebih banyak daripada yang diperlukan. Sebagai contoh, dua tumpuan sendi dapat digunakan untuk menumpu balok tersebut (lihat Bab 3.3.2).

Struktur-struktur yang mempunyai hubungan atau tumpuan yang memberikan lebih banyak daripada jumlah minimum yang diperlukan disebut *struktur statis tak tentu.* Karena ada anu (berupa gaya tahanan/reaksi) yang lebih banyak dari banyak persamaan keseimbangan, maka kita tidak dapat mencari besar masing-masing gaya tahanan hanya dengan statika. Dengan demikian diperlukan teknik lain. Hal ini akan dibahas pada bab lain dalam buku ini.

CONTOH

Tentukan reaksi untuk struktur yang diperlihatkan pada Gambar 2.16.



GAMBAR 2.16 Model yang digunakan untuk mencari reaksi.

Solusi:

Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0$:

$$R_{A_y} + R_{B_y} - wL = 0$$

Beban total yang bekerja dalam arah ke bawah akibat beban terdistribusi, dengan mudah dapat diperoleh dengan mengalikan beban terbagi rata dengan panjang di mana beban tersebut bekerja. Perhatikan bahwa arah reaksi anu R_B pada mulanya belum diketahui karena titik rol dapat menyalurkan gaya hanya dalam arah tegaklurus terhadap permukaan bergeraknya rol. Dengan demikian, R_{BY} harus sebesar $R_B \sin 60^\circ$. Arah R_A pada mulanya belum diketahui.

Keseimbangan momen terhadap titik A: $\Sigma M_A = 0$:

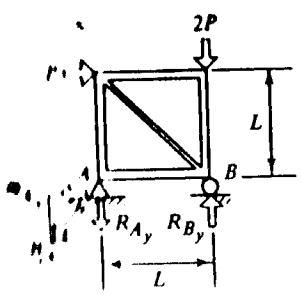
$$+R_{B_y}(L) - (wL)\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \quad \textit{atau} \quad R_{B_y} = \frac{wL}{2}$$

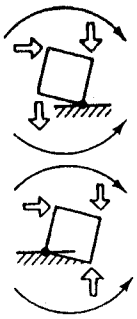
Dengan demikian, $R_{Ay} = wL/2$ dari $\Sigma F_y = 0$. Semua komponen anu dari kedua gaya reaksi melalui pusat momen, karena itu lengan momennya adalah nol dan tidak masuk ke dalam persamaan. Momen yang diakibatkan oleh beban terdistribusi diperoleh dengan membayangkannya terpusat dan bertitik tangkap di pusat massanya, kemudian momennya diperoleh dengan mengalikannya dengan jarak titik massa tersebut ke titik *A* (lihat Bab 2.2.5). Pemodelan beban terbagi dengan cara demikian sering kali dilakukan dengan maksud mencari reaksi. Akan tetapi, hal ini tidak berlaku untuk tujuan lain seperti mencari ukuran balok.

Mencari reaksi:
Karena R_{By} tidak diketahui, maka R_B dapat dihitung berikutnya. Jadi, $R_{By} = R_B \sin 60^\circ$ atau $R_B = R_{By}/\sin 60^\circ = (wL/2) / \sin 60^\circ = 0,58wL$. Selanjutnya, $R_{Bx} = R_B \cos 30^\circ$ atau $0,29wL$. Dari $\Sigma F_x = 0$, terlihat bahwa $R_{Bx} = R_{Ax}$. Dengan demikian, $R_{Ax} = 0,29wL$. Karena $R_{Ay} = wL/2$, *maka diper*leh $R_A = 0,58wL$.

CONTOH

Tentukan reaksi pada struktur yang terlihat pada Gambar 2.17.





Momen terhadap *B* akibat gaya eksternal

Momen tahanan yang harus diberikan oleh reaksi

Momen terhadap *A* akibat gaya eksternal

Momen tahanan yang harus diberikan oleh reaksi

Arah-arah reaksi dapat ditentukan dengan melihat bagaimana gaya eksternal cenderung memutar benda

GAMBAR 2.17 Contoh.

Solusi:

Keseimbangan momen terhadap titik A: $\sum M = 0$ ↻:

$$-P(L) - 2P(L) + R_{B_y}(L) = 0 \quad \text{atau} \quad R_{B_y} = 3P \uparrow$$

Keseimbangan dalam arah vertikal: $\sum F_y = 0$ ↑+:

$$-R_{A_y} + R_{B_y} - 2P = 0; \qquad \text{jadi } R_{A_y} = P \downarrow$$

Keseimbangan gaya dalam arah horizontal: $\sum F_x = 0 \overset{+}{\rightarrow}$:

$$-R_{A_x} + P = 0 \quad \text{atau} \quad R_{A_x} = P \leftarrow$$

2.4.2 Momen, Gaya, dan Tegangan Internal

Jenis-jenis Sistem Gaya Internal. Momen dan gaya internal timbul di dalam struktur sebagai akibat adanya sistem gaya eksternal yang bekerja pada struktur dan berlaku bersama-sama sebagai sesuatu yang mempertahankan keseimbangan partikel atau elemen dari suatu struktur. Dua jenis umum dari gaya dan momen akan dibahas di sini: (1) gaya dan momen yang timbul pada titik hubung antara bagian-bagian elemen dari struktur yang lebih besar, dan (2) gaya serta momen yang timbul di dalam serat aktual titik atau elemen struktural.

Gaya-gaya pada Hubungan. Gaya-gaya dan momen yang timbul pada titik hubung antara dua bagian susunan struktur secara konseptual tidak berbeda dengan gaya reaksi yang telah dibahas sebelum ini. Perbedaan yang ada di antara keduanya hanyalah penamaan yang menunjukkan di mana terjadinya. Setiap bagian dari suatu struktur mempunyai reaksi untuk mempertahankan keseimbangan bagian tersebut seperti halnya pada struktur yang lebih besar, yang mempunyai reaksi untuk mempertahankan keseimbangannya.

Gaya dan momen yang timbul pada titik hubung adalah sedemikian rupa sehingga gaya reaksi dan momen yang bekerja pada satu bagian yang dihubungkannya sama besar dan berlawanan arah dengan gaya serta momen pada bagian tersambung lainnya. Hal ini terjadi sesuai dengan hukum Newton ketiga yang telah dibahas sebelum ini.

Gaya dan momen dibahas secara lebih rinci pada Bab 4.3 dan 5.3 sehubungan dengan analisis rangka batang dan pelengkung tiga sendi.

Tarik dan Tekan. Seperti telah disinggung di atas, momen dan gaya internal dapat timbul di dalam serat suatu benda yang mengalami sistem gaya eksternal. Di sini akan ditinjau terlebih dulu gaya tekan dan tarik internal pada suatu batang.

Tinjau sistem seperti yang terlihat pada Gambar 2.18. Dengan intuisi, jelaslah bahwa ada gaya tarik yang timbul di dalam kabel yang memikul blok, yang besarnya sama dengan berat blok. Secara formal, diagram keseimbangan dapat digambar seperti yang terlihat pada Gambar 2.18. Keseimbangan blok dapat dipertahankan oleh adanya gaya internal F_i di dalam kabel, yang dalam hal ini sama dengan berat blok. Juga jelas bahwa sistem ini dapat diuraikan dengan berbagai cara. Hubungan antara gaya resultan internal F_i ini dan intensitas satuan dari gaya di dalam material batang tarik akan dibahas tersendiri.

Gaya tekan internal tentu saja sama dalam hal karakternya, tetapi berlawanan arti dengan gaya tarik. Gambar 2.18 mengilustrasikan batang dengan gaya tekan internal yang bervariasi karena adanya sistem gaya eksternal. Besar dan arah gaya internal yang timbul adalah sedemikian rupa sehingga *semua* bagian struktur berada dalam keseimbangan, tidak peduli bagian struktur mana yang ditinjau.

Gaya tarik dan tekan yang kolinear dengan sumbu memanjang batang sering juga disebut *gaya aksial* atau kadang-kadang disebut *gaya normal.* Diagram yang diperlihatkan dalam Gambar 2.18 sering digambar untuk memperlihatkan secara grafis variasi gaya aksial internal yang ada di dalam batang.

Tegangan Internal di dalam Batang Tarik. Dalam pembahasan sebelum ini, gaya tekan atau tarik internal yang ada pada suatu penampang di dalam struktur telah ditinjau. Di sini akan dibahas gaya internal yang timbul pada suatu titik di dalam penampang melintang. Ide dasar penting yang diperkenalkan di sini ialah konsep mengenai *tegangan* atau *intensitas gaya persatuan luas.*

Tinjaulah batang tarik sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 2.19. Secara intuitif jelaslah bahwa tarik internal yang ada tidak terpusat pada satu titik saja (seperti panah yang terlihat pada Gambar 2.19) di dalam penampang batang tersebut, tetapi terdistribusi di seluruh penampang melintang. Gaya internal total yang diperlukan untuk menjaga keseimbangan gaya eksternal pada batang, secara aktual adalah resultan dari gaya yang terdistribusi (atau tegangan) yang bekerja pada penampang melintang.

Pada elemen sederhana yang memikul gaya tarik, wajarlah apabila kita berasumsi bahwa apabila gaya eksternal bekerja di sepanjang sumbu batang dan pada titik berat atau titik simetri penampang melintang, maka tegangan yang timbul pada penampang mempunyai intensitas merata. Resultannya akan mempunyai

garis kerja yang sama dengan garis kerja gaya eksternal yang ada. Apabila tegangan terdistribusi merata, maka besarnya adalah:

$$\text{tegangan} = \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} \quad \text{atau} \quad f = \frac{P}{A}$$

di mana f adalah tegangan (intensitas gaya) per satuan luas, P adalah gaya aksial yang ada, dan A adalah luas penampang melintang yang ditinjau. Tegangan demikian disebut *tegangan normal* atau *tegangan aksial.* Apabila gaya eksternal berupa gaya tarik, maka tegangannya sama juga dengan di atas, tetapi berupa tegangan normal tarik.

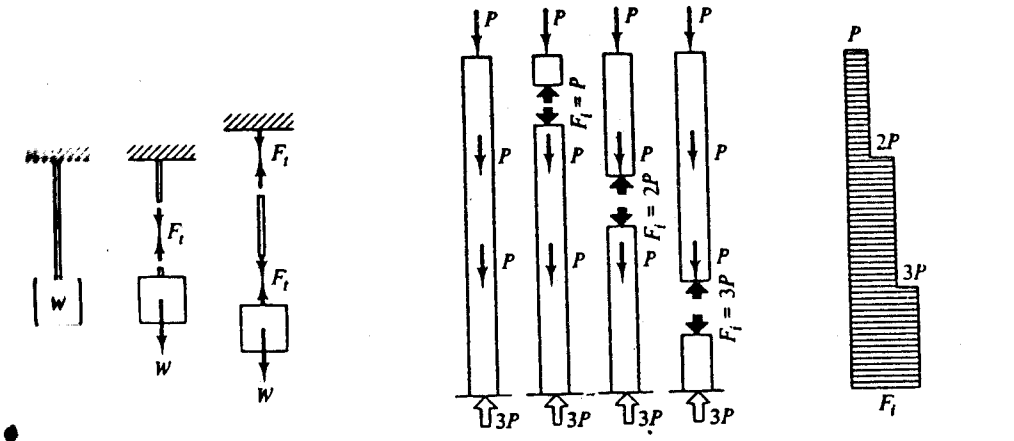


Diagram benda bebas

(a) Batang tarik

Diagram benda bebas

(b) Batang tekan

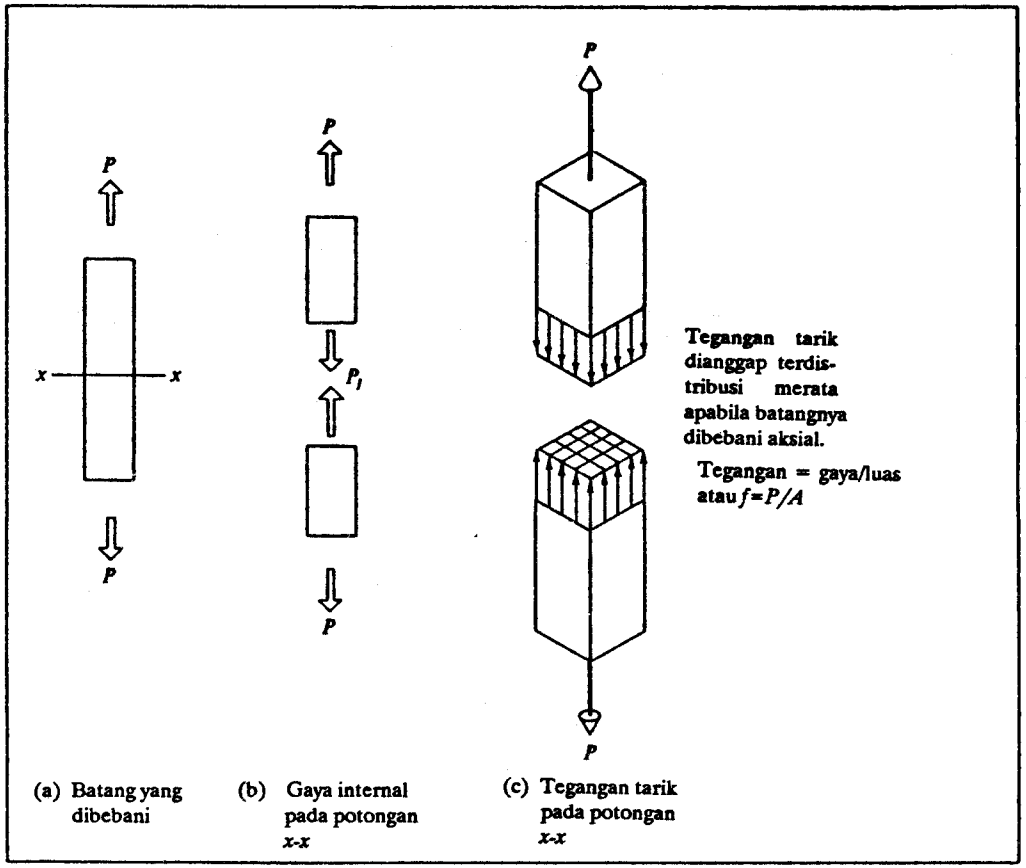
Diagram gaya normal

GAMBAR 2.18 Gaya tekan dan terik internal pada batang.

Asumsi bahwa tegangan yang diasosiasikan dengan gaya aksial itu terdistribusi merata di seluruh penampang melintang adalah benar apabila beban yang bekerja adalah aksial murni, dan batang yang dibebani adalah lurus dan mempunyai penampang melintang seragam di seluruh panjangnya. Pada satu hal yang tidak demikian, seperti apabila ada diskontinuitas pada batang, tegangan yang ada adalah kompleks. Sekalipun demikian, asumsi di atas pada umumnya cukup baik dan dapat diterima sebagai hipotesis pada suatu *preliminary design* (prarencana).

CONTOH

Suatu batang berpenampang bujursangkar yang mempunyai ukuran 2 in. x 2 in. (50,8 mm x 50,8 mm) memikul beban tarik sebesar 24000 lb (106,75 kN). Berapakah taraf tegangan yang ada pada satu titik khusus pada penampang melintang?



GAMBAR 2.19 Batang tarik.

Solusi:

Dengan beranggapan bahwa tegangan internal terdistribusi secara merata:

$$\text{tegangan} = \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} \quad \text{atau} \quad f = \frac{P}{A} = \frac{24000 \text{ lb}}{2 \text{ in. x } 2 \text{ in.}} = 6000 \text{ lb/ft}^2$$

atau

$$f = \frac{106{,}75 \text{ kN}}{50{,}8 \text{ x } 50{,}8 \text{ mm}}$$
$$= 0{,}0414 \text{ kN/mm}^2 = 41{,}4 \text{ N/mm}^2$$

Perlu diperhatikan bahwa tegangan normal atau aksial pada suatu batang hanya bergantung pada beban yang bekerja dan luas penampang melintang yang ditinjau. Tegangan aktual yang timbul *tidak* bergantung pada jenis material batang tersebut.

Momen lentur, gaya lintang, dan jenis-jenis lain tegangan mempunyai distribusi yang *tidak* terbagi rata, dan akan dibahas pada Bab 6.

Kekuatan Batang Tarik. Tinjaulah batang yang dibebani oleh gaya tarik. Kekuatan elemen berjenis demikian bergantung pada banyak faktor. Ragam kegagalan yang mungkin terjadi padanya adalah putusnya batang pada lokasi terlemah di sepanjang batangnya. Kapasitas pikul beban batang yang mengalami tarik tidak bergantung pada panjang batang apabila batang tersebut mempunyai penampang melintang yang seragam (dalam arti luas dan bahannya). Adanya satu bagian terlemah, seperti misalnya titik berpenampang melintang lebih kecil, menentukan kapasitas keseluruhan batang (pada lokasi titik tersebut, taraf tegangan yang diberikan oleh $f = P/A$ lebih besar dari titik penampang lainnya karena A yang lebih kecil tadi).

Apabila suatu batang dibebani aksial, maka timbul tegangan yang diindentifikasikan sebagai $f = P/A$. Jika material yang dipakai dapat menahan intensitas tegangan tadi, maka batang tersebut dapat memikul beban yang bekerja. Apabila taraf tegangannya bertambah besar akibat bertambahnya beban, misalnya, akan ada titik di mana intensitas tegangan yang timbul melebihi kapasitas material untuk menahan kegagalan tarik. Taraf tegangan ini disebut *taraf tegangan gagal* dari material tersebut. Besarnya hanya bergantung pada material. Taraf tegangan gagal secara eksperimental dapat ditentukan untuk berbagai material. Apabila taraf tegangan *aktual* yang diberikan oleh $f = P/A$ pada suatu batang melebihi taraf tegangan gagal material yang dipakai, maka batang tersebut akan mengalami kegagalan tarik.

Untuk baja, eksperimen menunjukkan bahwa taraf tarik yang ada dimulai dengan terjadinya *leleh* yang besarnya sekitar F_{leleh} = 36000 lb/in.^{2} (248 N/mm^2 atau 248 MPa). Pada Bab 2.5 dibahas sifat material secara lebih rinci.

Tegangan Izin. Apabila kita ingin meninjau apakah suatu penampang batang mampu memikul beban tarik yang diberikan, terlebih dahulu kita harus menentukan taraf tegangan aktual di dalam batang tersebut *($f = P/A$).* Jika taraf tegangan aktual ini lebih kecil daripada taraf tegangan gagal yang diperoleh dari eksperimen untuk material tersebut, maka batang itu dapat memikul beban yang diberikan. Akan tetapi, untuk tinjauan desain, diinginkan suatu pernyataan ukuran batang yang melibatkan faktor keamanan. Tegangan-tegangan beban dan gagal tidak pernah dapat secara tepat diprediksi dengan kepastian mutlak, karena itu perlu dibuatkan desain batang yang konservatif.

Salah satu cara untuk memasukkan faktor keamanan ke dalam proses desain adalah dengan menggunakan *tegangan izin (F_t),* bukan tegangan gagal atau tegangan leleh, sebagai ukuran untuk membandingkan tegangan aktual. Jadi:

$$F_t \text{ izin} = \frac{F_{\text{leleh}}}{\text{faktor keamanan}}$$

Untuk baja, misalnya, faktor keamanan yang sering digunakan adalah 1,5. Dengan demikian, taraf tegangan izin untuk batang baja adalah F_t = (36000 lb/in.^{2})/1,5 = 24000 lb/in.^{2} atau F_t = 248 N/mm^2)/1,5 = 165 N/mm^2. Harga ini dapat digunakan dalam mengevaluasi suatu ukuran batang yang dibebani atau dalam menentukan ukuran penampang yang diperlukan untuk suatu batang yang dibebani. Dalam menentukan ukuran baru suatu penampang, luas penampang melintang yang diperlukan untuk suatu batang yang memikul beban tarik P adalah:

$$A_{perlu} = \frac{\text{gaya}}{\text{tegangan izin}} = \frac{P}{F_t}$$

CONTOH

Berapakah diameter batang baja yang diperlukan untuk memikul beban tarik sebesar 10000 lb (44,5 kN)? Asumsikan bahwa tegangan izin baja adalah F_t = 24000 lb/in^2. (165 MPa atau 165 N/mm^2).

Solusi:

Luas yang diperlukan:

$$A = \frac{P}{F_t} = \frac{10.000 \text{ lb}}{24.000 \text{ lb/in.}^2} = 0{,}416 \text{ in.}^2$$

$$= \frac{44.500 \text{ N}}{165 \text{ N/mm}^2} = 270 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\pi d^2}{4} = 0{,}416 \text{ in}^2. \text{ atau } d = 0{,}73 \text{ in.}$$

$$= 270 \text{ mm}^2 \text{ atau } d = 18{,}5 \text{ mm}$$

Diameter:

$$\frac{\pi d^2}{4} = 0{,}416 \text{ in.}^2 \text{ atau } d = 0{,}73 \text{ in.}$$

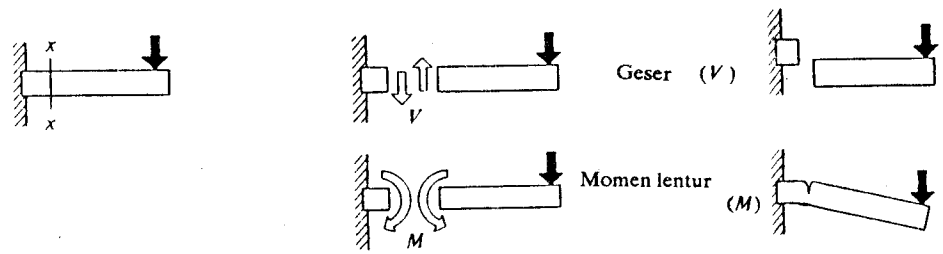
$$= 270 \text{ mm}^2 \text{ atau } d = 18{,}5 \text{ mm.}$$

2.4.3 Geser dan Momen

Fenomena Dasar. Pembahasan ini dimulai dengan mempelajari jenis momen dan gaya internal yang timbul pada elemen struktur yang memikul sistem gaya eksternal yang bekerja transversal terhadap sumbu elemen struktur tersebut. Konsep mengenai geser dan momen di dalam struktur yang diperkenalkan di sini adalah dasar penting untuk mengerti perilaku struktur yang dibebani. Konsep ini juga memberikan dasar untuk mengembangkan cara-cara dalam merancang struktur. Geser dan momen ditinjau secara langsung tetapi abstrak. Konsep yang sama akan diuraikan pada bagian lain dalam konteks peninjauan jenis struktur khusus (rangka batang). Pada bagian lainnya akan dibahas lebih mendalam mengenai geser dan momen dalam kaitannya dengan elemen-elemen struktural lainnya.

Tinjaulah balok kantilever yang dibebani terpusat di ujung seperti yang terlihat pada Gambar 2.20. Ada dua cara utama balok tersebut mengalami kegagalan akibat beban tersebut. Salah satu cara kegagalan adalah dua potongan balok yang berdekatan bergelincir satu sama lain dalam arah sejajar dengan bidang kontaknya. Ini adalah yang disebut *kegagalan geser.* Gaya internal yang timbul di dalam balok yang diasosiasikan dengan fenomena ini disebut *gaya geser internal.* Gaya geser internal ini terbentuk sebagai respons terhadap komponen sistem gaya eksternal yang bekerja dalam arah transversal sumbu memanjang balok, dan mempunyai potensi yang menyebabkan terjadinya gelincir dalam arah transversal seperti yang terlihat pada Gambar 2.20c. Gaya geser internal ini menahan atau membentuk keseimbangan dengan gaya geser eksternal total yang dapat menyebabkan terjadinya gelincir transversal. Kegagalan dengan jenis seperti diilustrasikan tadi terjadi apabila balok tersebut tidak dapat lagi memberikan gaya geser internal yang cukup.

Jenis kegagalan kedua yang mungkin adalah seperti yang terlihat pada Gambar 2.20(c). Jenis kegagalan ini tentu saja diasosiasikan dengan kecenderungan gaya eksternal transversal menyebabkan rotasi pada struktur atau *melentur (bend).* Karena rotasi bebas tidak dapat terjadi pada benda tegar (kecuali apabila ada hubungan sendi), maka tahanan internal atau momen penyeimbangan yang sama besar dan berlawanan arah dengan momen yang bekerja (momen yang diasosiasikan dengan kecenderungan rotasi akibat gaya eksternal) harus terbentuk di dalam struktur. Kegagalan berjenis demikian terjadi apabila struktur tidak dapat lagi memberikan momen tahanan yang sama besar dengan momen yang bekerja.



(a) Struktur kantilever

(b) Momen dan gaya internal timbul pada balok agar dapat mempertahankan keseimbangan bagian-bagian struktur.

(c) Ragam kegagalan yang mungkin: Apabila struktur tidak dapat memberikan gaya atau momen internal, terjadi kegagalan seperti tergambar.

GAMBAR 2.20 Geser dan momen di dalam struktur

Pada penampang sembarang dari elemen struktur yang dibebani, momen dan gaya geser timbul secara simultan. Apabila elemen struktur tersebut dapat dibagi menjadi dua bagian, maka momen dan gaya yang timbul secara internal akan bertindak untuk mempertahankan keseimbangan translasi dan rotasi masing-masing bagian. Kedua-duanya juga merupakan aksi internal pada satu bagian dan reaksi internal pada bagian lainnya. Seperti yang terlihat pada bagian berikut, salah satu tujuan proses desain struktural adalah untuk menciptakan konfigurasi struktural yang layak mampu memberikan momen dan geser internal secara efisien dan dengan faktor keamanan yang cukup terhadap kegagalan momen dan geser.

Momen dan gaya geser internal yang dibahas di atas dapat terbentuk pada *sembarang* struktur yang memikul beban transversal. Penentuan besar momen dan geser merupakan proses langsung yang didasarkan atas struktur maupun atas bagian. struktur harus berada dalam keadaan keseimbangan antara gaya-gaya eksternal dan gaya-gaya (serta momen) internal. Sistem gaya-gaya eksternal biasanya sudah diketahui. Sebagian dari sistem gaya yang pada mulanya belum diketahui dapat dengan mudah diketahui dengan metode yang dibahas di atas. Apabila keseimbangan suatu bagian yang terisolasi dari suatu struktur ditinjau, momen dan geser internal yang harus ada pada penampang yang terpisahkan dapat dihitung dengan menggunakan tinjauan keseimbangan dengan melibatkan anu dari sistem gaya eksternal.

Elemen struktur seperti yang terlihat pada Gambar 2.21 ada dalam keadaan keseimbangan. Asumsikan bahwa kita ingin mengetahui perilaku gaya-gaya internal pada lokasi sembarang seperti pada penampang x–x di tengah bentang. Untuk memperoleh gaya-gaya internal, struktur tersebut dipisahkan menjadi dua bagian pada lokasi tersebut. Tinjaulah bagian kiri dari struktur [Gambar 2.21(b)]. Jelaslah bahwa bagian struktur ini tidak berada dalam keadaan keseimbangan apabila pada bagian ini hanya ada sistem gaya eksternal. Efek total akibat beban eksternal pada bagian ini ialah bagian ini mengalami translasi vertikal ke bawah dan berotasi searah jarum jam. Gaya berarah ke bawah disebut *gaya geser eksternal* (V_E) yang ada pada penampang tersebut. Dalam hal ini gaya tersebut adalah:

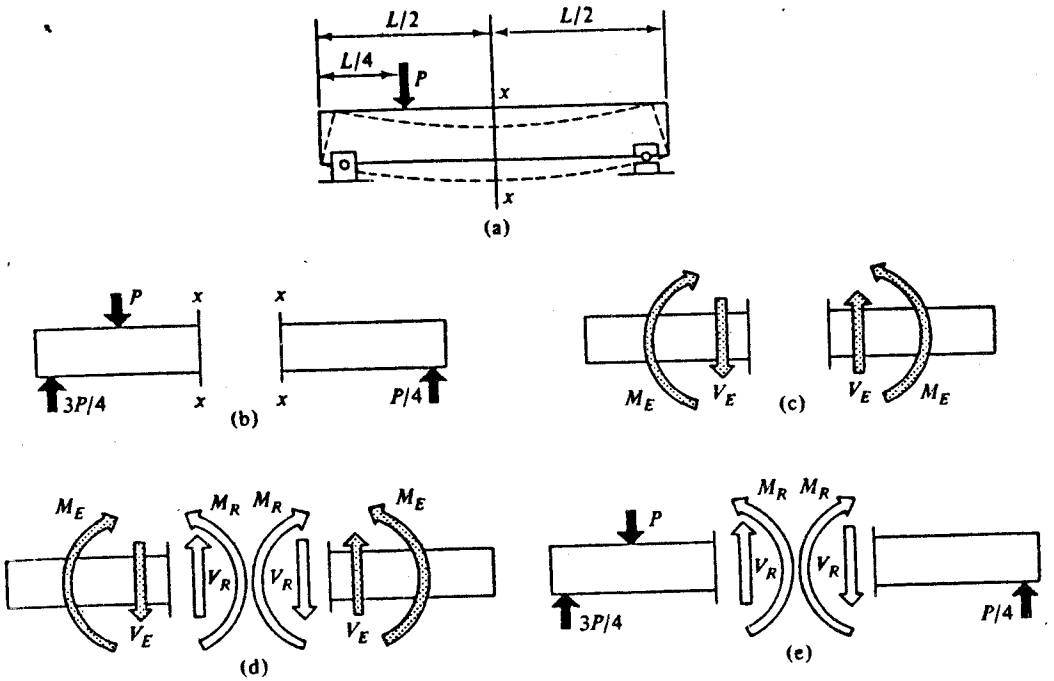
$$V_E = \frac{+3P}{4} - P = \frac{P}{4} \downarrow$$

Agar bagian ini berada dalam keadaan keseimbangan, jelaslah bahwa struktur tersebut harus memberikan *gaya geser tahanan* (V_R) yang besarnya sama tetapi berlawanan arah. Jadi, haruslah $V_E = V_R$. Dengan demikian, $V_R = P/4 \uparrow$.

Efek rotasional total yang diasosiasikan dengan bagian dari sistem gaya eksternal yang bekerja pada bagian struktur yang ditinjau (dalam hal bagian kiri dari tengah bentang) disebut *momen lentur eksternal* (M_E). Apabila perjanjian tanda kita abaikan dahulu untuk sementara (perjanjian tanda akan dibahas kemudian), momen lentur eksternal adalah:

$$M_E = \left(\frac{3P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) - (P)\left(\frac{L}{4}\right) = \frac{PL}{8}$$

Agar dapat tercapai keseimbangan, jelaslah bahwa struktur tersebut harus memberikan *momen tahanan internal* (M_R) yang besarnya sama dan berlawanan arah dengan momen lentur eksternal. Jadi, haruslah $M_R = M_E = PL/8$.



(a) Balok yang dibebani dan bentuk terdefleksi

(b) Balok dipotong menjadi dua bagian. Bagian-bagian ini tidak berada dalam keseimbangan

(c) Efek total sistem gaya eksternal pada setiap bagian balok terhadap penampang x-x

Bag. Kiri $V_E = +3P/4 - P = P/4 \downarrow$

$M_E = (3P/4)(L/2) - (P)(L/4) = PL/8$

Bag. Kanan $V_E = P/4 \uparrow$

$M_E = (P/4)(L/2) = PL/8$

Perhatikan bahwa V_E dan M_E sama besar pada kedua bagian balok, tetapi berlawanan arah.

(d) Agar setiap bagian balok berada dalam keseimbangan, harus ada V_R dan M_R internal yang diberikan oleh struktur. Agar Seimbang, maka: $V_R = V_E$ dan $M_R = M_E$

(e) Diagram benda bebas akhir untuk setiap bagian memperlihatkan sistem gaya eksternal yang bekerja pada setiap bagian dan geser serta momen internal. Perhatikan bahwa momen dan gaya internal tersebut sama besar dan berlawanan arah pada kedua bagian. Momen dan geser internal aksi pada satu bagian dan reaksi pada bagian lain.

GAMBAR 2.21 Momen dan gaya geser internal pada suatu penampang balok.

Pendekatan yang lebih langsung adalah dengan menuliskan keseimbangan diagram benda bebas dari bagian struktur yang ditinjau [lihat Gambar 2.21(e)]. Jadi:

$$\sum F_y = 0:$$

$$\frac{+3P}{4} - P + V_R = 0 \qquad \therefore V_R = \frac{P}{4} \uparrow$$

$$\sum M_x = 0:$$

$$+\left(\frac{3P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) - (P)\left(\frac{L}{4}\right) - M_R = 0 \qquad \therefore M_R = \frac{PL}{8}$$

Jelas bahwa pendekatan terakhir ini secara konseptual tidak berbeda dengan pendekatan sebelumnya. Akan tetapi, dengan pendekatan terakhir ini tidak ditekankan bahwa sistem gaya eksternal membentuk gaya translasional dan momen pada penampang, yang harus diimbangi oleh momen dan gaya internal yang secara numerik sama tetapi berlawanan arah.

Harga momen dan gaya geser internal ini dapat juga diperoleh dengan meninjau keseimbangan bagian kanan dari struktur. Gaya geser eksternal V_E, untuk bagian ini diberikan oleh $V_E = P/4\uparrow$. Karena $V_E = V_R$, maka $V_R = P/4\downarrow$. Secara numerik gaya geser ini sama dengan yang telah diperoleh terdahulu, hanya saja sekarang berlawanan arahnya.

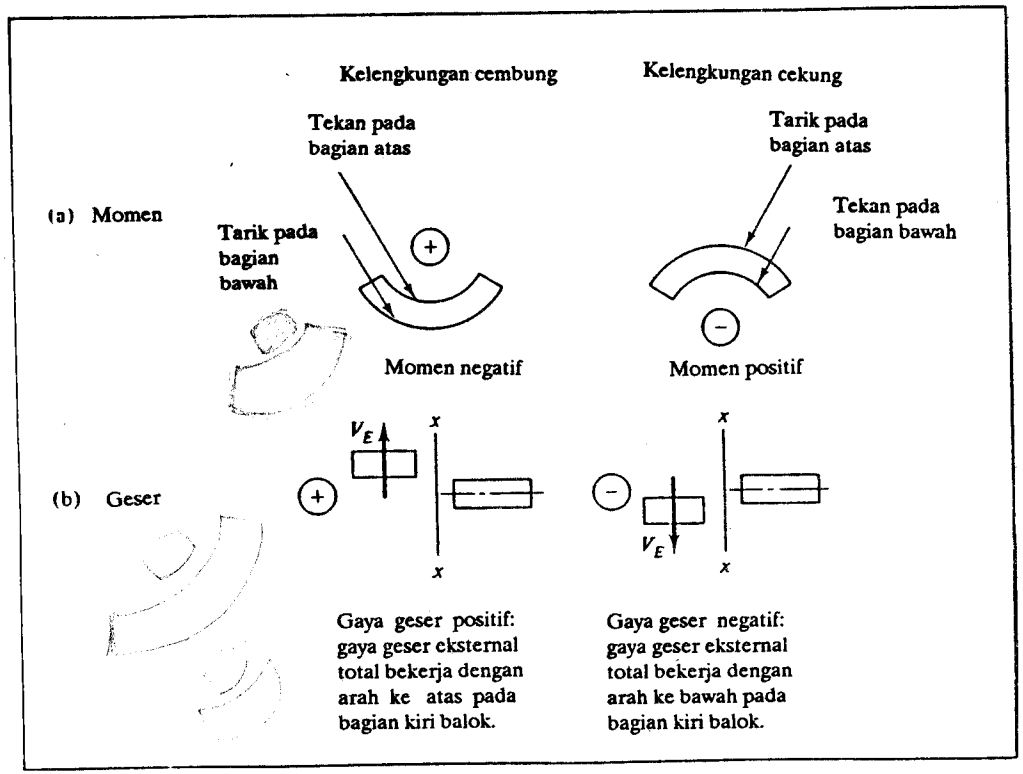
Dengan cara serupa, momen eksternal pada bagian yang kanan adalah:

$$M_E = \left(\frac{P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{PL}{8}$$

Karena $M_E = M_R$, maka $M_R = PL/8$. Momen ini secara numerik sama dengan momen yang diperoleh sebelumnya, tetapi berlawanan arah.

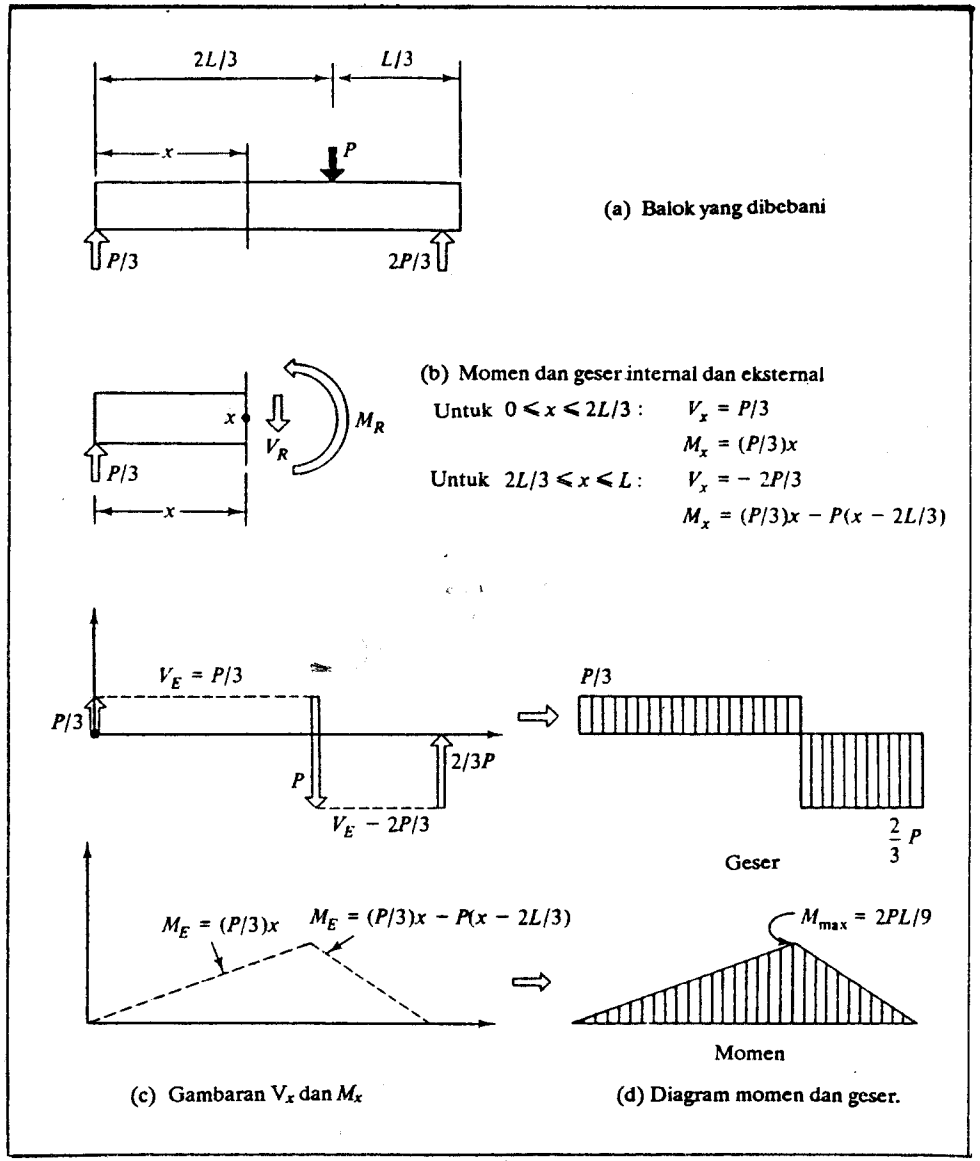
Perjanjian Tanda. Bahwa gaya geser dan momen yang diperoleh dengan meninjau bagian dari suatu struktur secara numerik harus sama tetapi berlawanan arah adalah suatu hal yang masuk akal dari fakta bahwa gaya-gaya yang diperoleh, secara aktual adalah internal dan merupakan aksi pada suatu bagian serta reaksi pada bagian yang lain. Hal ini tidak menimbulkan kesulitan dalam perjanjian tanda. Apabila perjanjian tanda ini hanya ditentukan oleh arahnya (seperti pada waktu menghitung reaksi), maka akan timbul kesulitan karena pada satu bagian bertanda positif sedangkan pada bagian yang lain bertanda negatif, sedangkan momen maupun geser yang dimaksud sama untuk kedua bagian yang ditinjau. Karena itulah perlu diadakan perjanjian tanda yang tidak bergantung pada bagian mana yang ditinjau. Perjanjian tanda untuk momen dan gaya geser yang umum digunakan ialah yang didasarkan atas efek fisisnya pada struktur. Untuk momen, ingat bahwa kecenderungan gaya eksternal pada bagian kiri maupun pada bagian kanan sama, yaitu struktur berdeformasi seperti yang terlihat pada sebelah kiri Gambar 2.22(a). Apabila sistem gaya eksternal cenderung menyebabkan kelengkungan *cekung* pada suatu penampang, maka momen lentur yang ada pada penampang tersebut mempunyai tanda *positif*. Apabila sistem

gaya eksternal mempunyai kecenderungan untuk mengalami kelengkungan *cembung* (atau cekung ke bawah) pada suatu penampang, maka momen yang ada mempunyai tanda *negatif*. Perhatikan bahwa perjanjian tanda ini tidak bergantung pada bagian mana dari struktur yang ditinjau. Dengan melihat hubungan antara momen dan kelengkungan (curvature) juga akan diperoleh *feeling* untuk mempelajari perilaku struktur.



GAMBAR 2.22 Perjanjian tanda yang digunakan untuk diagram momen dan geser.

Untuk geser, perjanjian tanda secara khas adalah apabila gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri dari struktur mempunyai resultan yang berarah vertikal ke atas, maka gaya geser disebut bertanda *positif*. Gaya geser positif ini diasosiasikan dengan kecenderungan gaya eksternal untuk mengakibatkan pergerakan relatif penampang seperti yang terlihat pada Gambar 2.22(b) kiri.



GAMBAR 2.23 Diagram momen dan geser untuk balok ditumpu sederhana yang memikul beban terpusat.

2.4.4 Distribusi Momen dan Geser

Diagram Momen dan Geser. Seperti yang dapat diduga dengan intusisi, umumnya ada variasi besar (dan tanda) pada momen dan geser yang ada pada penampang-penampang pada struktur. Distribusi gaya geser dan momen di dalam struktur dapat

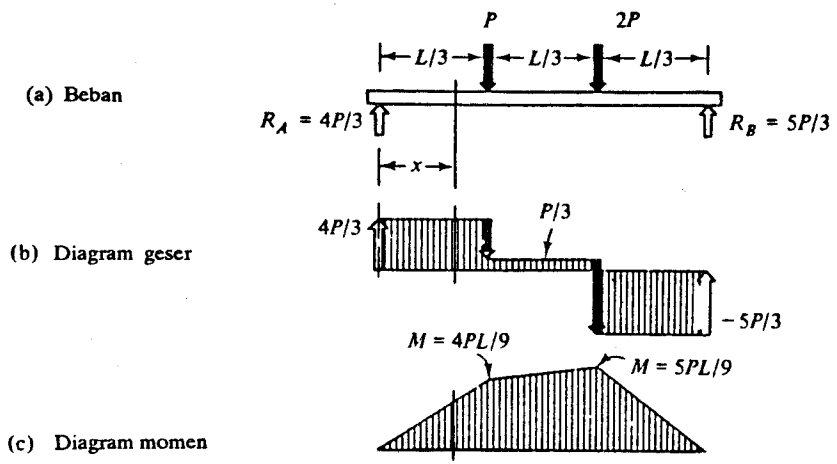
diperoleh dengan meninjau secara bergantian keseimbangan bagian elemen yang berbeda-beda dari struktur, dan menghitung momen dan gesernya untuk setiap bagian. Untuk memvisualkan distribusi momen dan geser tersebut, harga yang diperoleh diplot secara grafis sehingga menghasilkan apa yang disebut *diagram momen lentur dan gaya geser.*

Perhatikan balok seperti yang terlihat pada Gambar 2.23(a) dan diagram benda bebas untuk bagian dari balok (sepanjang x) di sebelah kiri beban. Seperti yang terlihat pada gambar, efek rotasional gaya-gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri balok terhadap penampang melintang yang didefinisikan sejauh x adalah $M_E = (P/3)$ (x). Efek translasional total adalah $V_E = P/3$, Dengan demikian, apabila x = 0, maka $M_E = 0$ dan $V_E = P/3$. Apabila x = $2L/3$, maka $M_E = 2PL/9$ dan $V_E = P/3$ (apabila penampang tersebut sangat dekat di kiri beban). Apabila x terletak di kanan beban tersebut, maka perlu ada persamaan baru untuk momen dan geser karena ada gaya yang baru yang bekerja pada bagian elemen balok yang ditinjau. Dengan demikian, $M_E = (P/3)$ (x) $- P[$ x $- \frac{2}{3}(L)]$ dan $V_E = + (P/3) - P = (-\frac{2}{3})$ P. Secara grafis momen dan geser ini dapat diplot seperti yang terlihat pada Gambar 2.23(c).

Contoh di atas mengilustrasikan prosedur umum untuk mencari distribusi momen dan geser pada suatu strktur. Diagram ini sangat berguna di dalam analisis dan desain struktur. Apa arti serta bagaimana menggambarkannya secara cepat, juga merupakan hal yang sangat penting. Perlu ditekankan di sini bahwa penggunaan diagram tersebut tidak hanya dibatasi pada balok. Diagram itu merupakan cara grafis untuk melihat efek sistem gaya eksternal yang bekerja pada sembarang jenis struktur.

CONTOH

Gambarlah diagram geser dan momen untuk struktur yang diilustrasikan dalam Gambar 2.24.



GAMBAR 2.24 Diagram momen dan geser: beban terpusat.

Solusi:

Persamaan untuk momen dan geser pada jarak x dari ujung kiri ditentukan dengan meninjau keseimbangan bagian struktur sebelah kiri x.

Untuk $0 < x < L/3$:

$$V_E = \frac{4P}{3}$$

$$M_E = \left(\frac{4P}{3}\right)x$$

Untuk $L/3 < x < 2L/3$:

$$V_E = \frac{4P}{3} - P = \frac{P}{3}$$

$$M_E = \left(\frac{4P}{3}\right)x - P\left(x - \frac{L}{3}\right)$$

Untuk $2L/3 < x < L$:

$$V_E = \frac{4P}{3} - P - 2P = -\frac{5P}{3}$$

$$M_E = \left(\frac{4P}{3}\right)x - P\left(x - \frac{L}{3}\right) - 2P\left(x - \frac{2L}{3}\right)$$

Persamaan-persamaan di atas dapat diplot untuk memperoleh diagram momen dan geser seperti yang terlihat pada Gambar 2.27. Gaya geser adalah konstan di antara beban-beban sementara momen bervariasi secara linear. Perhatikan bahwa harga momen kritis terjadi pada $x = L/3$, yaitu sebesar $M = 4PL/9$; dan $x = 2L/3$, yaitu sebesar $M = 5PL/9$. Perubahan utama pada gaya geser juga terjadi pada kedua titik tersebut. Menarik juga untuk diperhatikan bahwa nilai momen maksimum tidak terjadi di tengah bentang, tetapi di titik di mana diagram lintangnya sama dengan nol.

Di dalam struktur yang memikul beban-beban terpusat, momen kritis dan gaya geser selalu terjadi langsung di bawah titik tangkap beban-beban terpusat. Dengan menggunakan observasi ini, diagram momen dapat digambar secara lebih mudah dengan meninjau penampang di bawah beban-beban terpusat. Dengan demikian, momen pada $x = L/3$ (titik tangkap beban pertama) adalah $M_E = (4P/3)\ (L/3 = 4PL/9$. Pada $x = 2L/3$ (titik tangkap beban terpusat kedua) adalah $M_E = (4P/3)\ (2L/3) - (P)\ (L/3) = 5PL/9$. Yang terakhir ini akan lebih mudah kalau meninjau bagian di kanan struktur; bukan yang kiri, jadi $M_E = (5P/3\ (L/3) = 5PL/9$. Nilai $4PL/9$ dan $5PL/9$ mendefinisikan titik-titik kritis diagram momen. Garis-garis lurus dapat digambar di antaranya karena secara sepintas sudah jelas bahwa diagram momen bervariasi secara linear di antara titik-titik kritis tersebut.

CONTOH

Gambarlah diagram momen dan geser untuk kantilever seperti yang terlihat pada Gambar 2.25.

Solusi:

Geser dan momen pada setiap penampang yang ditunjukkan oleh jarak x dari ujung kiri balok ditentukan dengan meninjau keseimbangan bagian struktur di kiri x. Momen akibat beban terbagi rata di kiri penampang yang ditinjau diperoleh dengan mengganti beban terdistribusi merata dengan beban terpusat yang ekuivalen secara statis dan bekerja pada pusat massa bagian beban merata tersebut (lihat Bab 2.2.5).

Untuk $0 < x < L$:

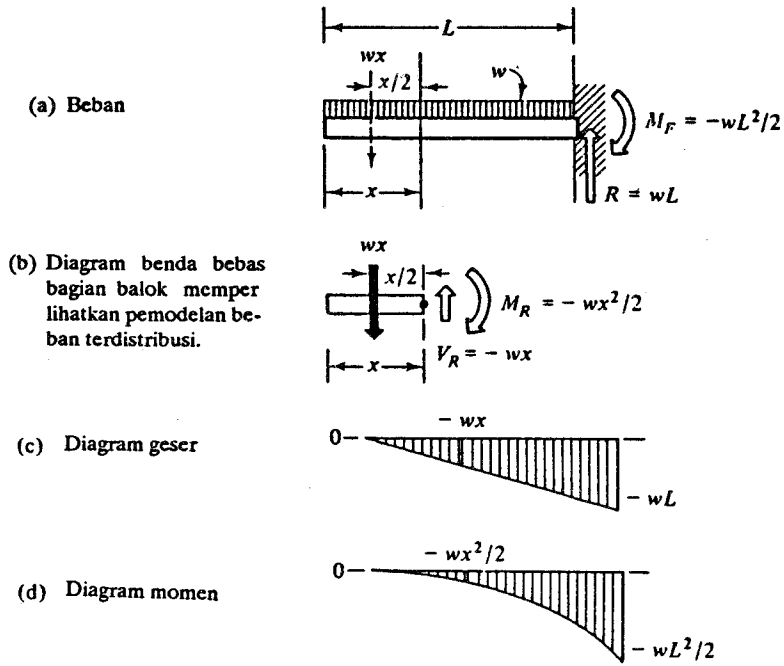
$$V_E = -wx$$

$$M_E = -wx\left(\frac{x}{2}\right) = -\frac{wx^2}{2}$$

Harga kritis terjadi pada $x = L$ di mana $V_E = -wL$ dan $M_E = -wL^2/2$. Perhatikan bahwa gaya geser bervariasi secara linear (berpangkat satu dalam x), sementara momen bervariasi secara pangkat dua dalam x.

CONTOH

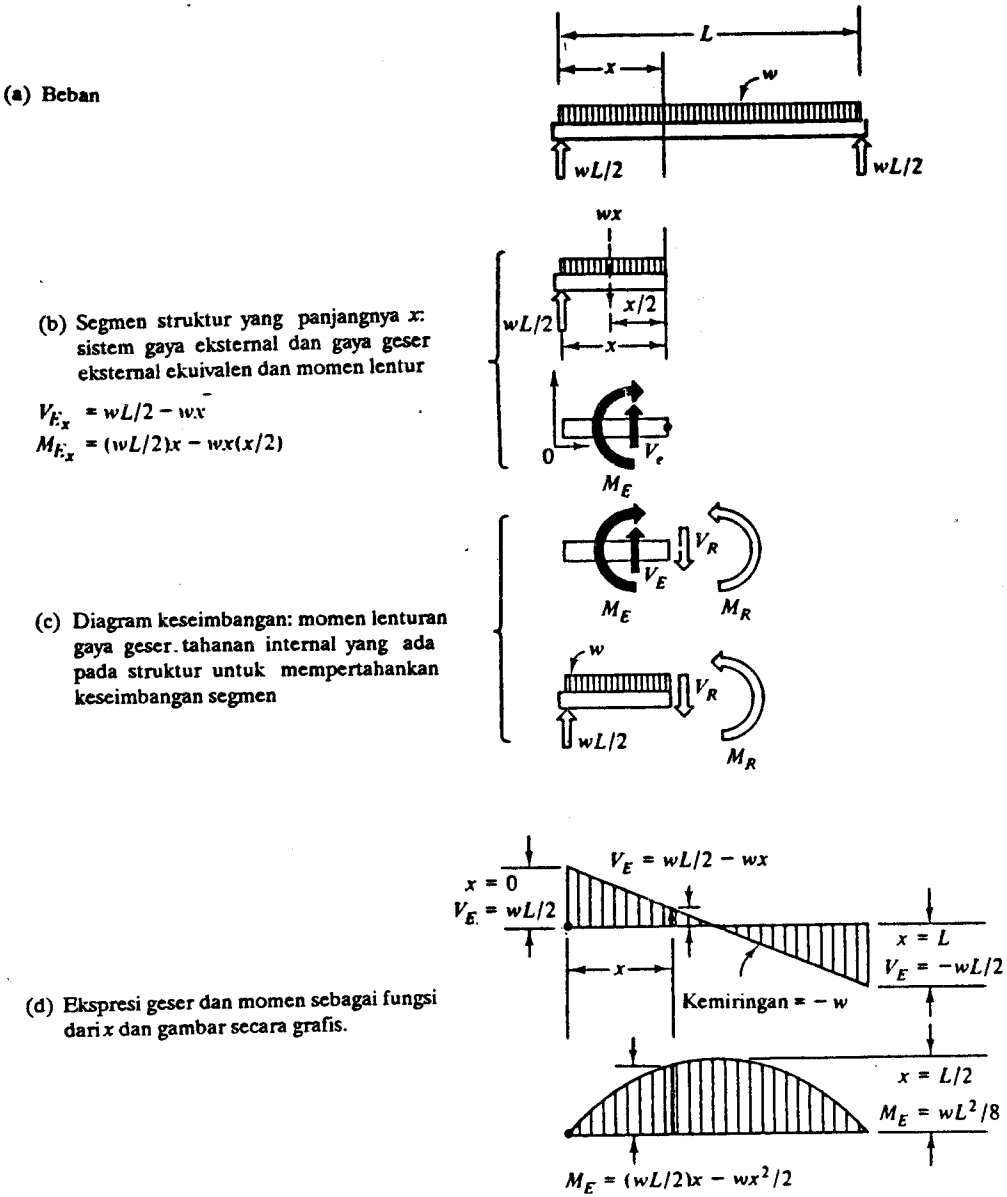
Gambarlah diagram momen dan geser untuk struktur bertumpuan sederhana, yang dibebani merata seperti yang terlihat pada Gambar 2.26.



GAMBAR 2.25 Diagram momen dan geser: struktur kantilever yang dibebani merata.

Solusi:

Seperti yang telah dibahas sebelum ini, efek sistem gaya eksternal yang bekerja pada sebagian struktur menyebabkan, pada penampang yang ditinjau, gaya geser translasional V_E dan momen rotasional M_E. Geser dan momen eksternal ini harus diimbangi oleh gaya geser tahanan internal V_R dan momen tahanan internal M_R yang



(b) Segmen struktur yang panjangnya x: sistem gaya eksternal dan gaya geser eksternal ekuivalen dan momen lentur

$V_{E_x} = wL/2 - wx$

$M_{E_x} = (wL/2)x - wx(x/2)$

(c) Diagram keseimbangan: momen lenturan gaya geser, tahanan internal yang ada pada struktur untuk mempertahankan keseimbangan segmen

(d) Ekspresi geser dan momen sebagai fungsi dari x dan gambar secara grafis.

GAMBAR 2.26 Diagram momen dan geser: Struktur bertumpuan sederhana yang dibebani merata.

dapat dicari dengan menggunakan keseimbangan struktur.

Untuk $0 < x < L$:

$$V_E = \frac{wL}{2} - wx$$

$$M_E = \left(\frac{wL}{2}\right)x - (wx)\left(\frac{x}{2}\right)$$

Perhatikan bahwa diagram geser ini bervariasi secara linear dan nilai maksimumnya pada $x = 0$ dan $x = L$, yaitu masing-masing $V_E = wL/2$ dan $V_E = -wL/2$. Diagram momen bervariasi secara pangkat dua dalam x dan mencapai nilai maksimum pada tengah bentang (di mana terjadi geser sama dengan nol). Momen maksimum pada penampang tersebut adalah $M = wL^2/8$. Momen sebesar ini sangat sering dijumpai di dalam teori struktur, dan sering dipakai dalam analisis dan desain balok di atas tumpuan sederhana yang dibebani merata.

Bentuk Diagram. Penyelidikan secara umum dapat dilakukan mengenai bentuk diagram geser dan momen. Beban terpusat biasanya menghasilkan geser yang besarnya konstan pada penampang-penampang struktur yang terletak di antara beban-beban dan atau reaksi sehingga diagram geser terdiri atas garis-garis horizontal. Sedangkan momen untuk kasus yang sama bervariasi secara linear (berpangkat satu dalam x) di antara beban-beban dan atau reaksi sehingga diagram momen berupa garis-garis yang miring. Beban yang terdistribusi merata menyebabkan gaya geser yang bervariasi secara linear sehingga diagram gesernya berupa garis lurus yang miring. Beban yang terdistribusi merata menyebabkan terjadinya momen yang bervariasi secara parabolik pangkat dua dalam x sehingga diagramnya berupa lengkungan kuadratik. Beban kombinasi juga akan menyebabkan bentuk yang berupa kombinasi. Pada umumnya dapat dikatakan bahwa momen maksimum terjadi pada titik di mana terjadi gaya geser sama dengan nol. Hal ini khususnya sangat berguna dalam penentuan momen desain kritis di dalam struktur yang mempunyai kondisi pembebanan yang tidak biasa.

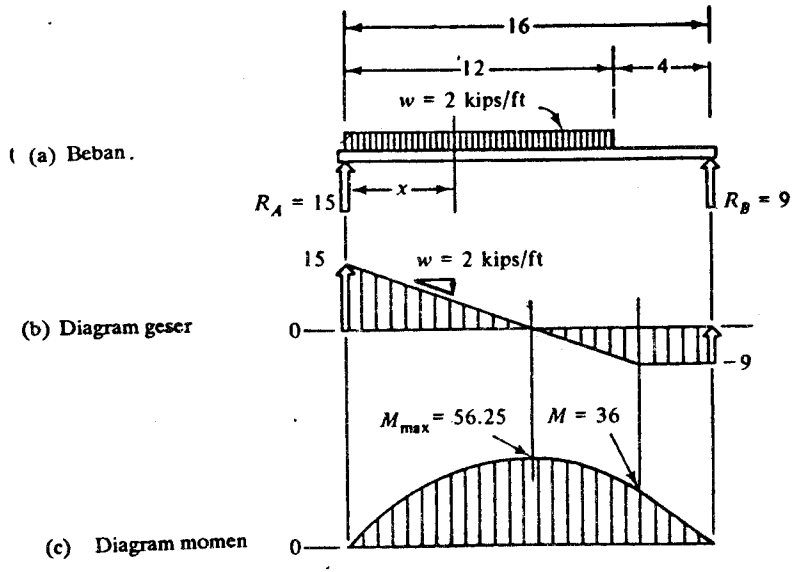
CONTOH

Gambarlah diagram geser dan momen untuk balok yang dibebani sebagian seperti yang terlihat pada Gambar 2.27.

Solusi:

Persamaan geser dan momen ditulis dan diplot dengan cara yang telah dibahas di atas.

Untuk $0 \lesssim x \lesssim 12$:	Untuk $12 \lesssim x \lesssim 16$:
$V_E = 15 - 2x$	$V_E = 15 - 2(12)$
$M_E = 15x - 2x\left(\frac{x}{2}\right)$	$M_E = 15x - 2(12)(x - 6)$

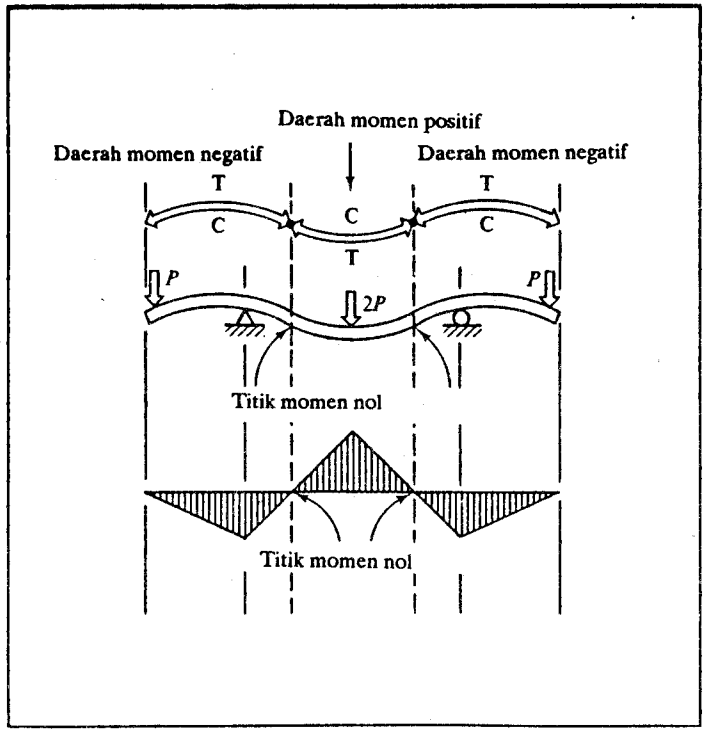


GAMBAR 2.27 Diagram geser dan momen: struktur dengan beban merata hanya pada sebagian struktur.

Perhatikan bahwa pada bagian di mana beban terdistribusi merata bekerja, diagram geser bervariasi secara linear dan diagram momen bervariasi secara parabolik pangkat dua. Penentuan momen maksimum merupakan pekerjaan panjang kalau yang dilakukan adalah mencoba-coba harga x ke dalam persamaan momen di atas. Cara langsung yang baik adalah dengan menggunakan fakta bahwa momen mempunyai harga kritis apabila gaya geser sama dengan nol.

Cara ringkas yang juga dapat digunakan dalam mencari lokasi dan besar momen maksimum adalah sebagai berikut. Untuk penampang sedikit di kanan reaksi tumpuan kiri, gaya geser adalah sebesar reaksi di tumpuan kiri itu sendiri. Kemudian untuk penampang semakin ke kanan, diagram lintang mempunyai kemiringan sebesar beban terbagi rata itu sendiri. Informasi ini dapat dipakai untuk menentukan titik di mana gaya geser sama dengan nol. Jadi, 15 = 2x, atau x = 7,5. Hal ini sama saja dengan menulis $V_E = 0$ pada persamaan geser yang tertulis di atas, yaitu 0 = 15 − 2x. Dengan mengingat bahwa momen pada umumnya mencapai harga kritisnya pada titik di mana gaya geser sama dengan nol, maka dihitung momen pada x = 7,5 untuk memperoleh momen maksimum, yaitu M_E = 15(7,5) − 2(7,5) (7,5) (2) = 56,25.

Hubungan antara Diagram Momen dengan Bentuk Lenturan Struktur. Sebagaimana telah disinggung sebelum ini, beban transversal menyebabkan bengkokan pada struktur. Bergantung pada bagimana beban tersebut bekerja, bengkokan itu dapat cekung ke atas atau sebaliknya. Bentuk lenturan pada seluruh bagian struktur berhubung langsung dengan bengkokan, dan dengan demikian bergantung pada momen yang ada.



GAMBAR 2.28 Hubungan antara diagram momen dan bentuk lenturan struktur.

Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar 2.28. Beban-beban yang bekerja di ujung-ujung kantilever menyebabkan bengkokan yang cekung ke bawah di bagian kiri dan kanan balok. Diagram momen pada daerah ini bertanda negatif. Sehubungan dengan bengkokan yang cekung ke bawah, pada serat atas struktur terjadi perpanjangan yang berarti tarik pada serat atas, dan terjadi perpendekan pada serat bawah yang berarti tekan pada serat bawah. Fenomena sebaliknya terjadi pada bagian tengah balok, yaitu *daerah momen positif.* Antara ke dua daerah (negatif dan positif) tentu saja ada daerah transisi. Karena kelengkungan yang terjadi berbalik arah, maka pada daerah transisi ini ada titik yang tidak bengkok dan mempunyai momen sama dengan nol. Titik-titik ini disebut sebagai *titik belok.* Berdasarkan hubungan tadi, sering juga sketsa diagram momen dibuat dengan terlebih dahulu menggambarkan sketsa lenturan struktur. Hubungan antara momen dengan lenturan juga dapat dipakai untuk mengecek ketepatan diagram yang diperoleh dari perhitungan.

2.4.5 Hubungan di antara Beban, Geser, dan Momen pada Struktur

Meskipun topik ini di luar lingkup pembahasan buku ini, dapat dibuktikan bahwa hubungan yang ada antara beban, geser, dan momen pada struktur adalah:

$w = dV/dx$, $V = dM/dx$, $V_B - V_A = \int_A^B w\,dx$, dan $M_B - M_A = \int_A^B V\,dx$.[2]

Dengan demikian,[1] besar beban di suatu titik sama dengan kemiringan diagram pada titik yang sama. Harga geser di suatu titik sama dengan kemiringan diagram momen di titik yang sama. *Perubahan* momen antara titik *A* dan *B* pada struktur dinyatakan dengan luas di bawah bidang geser antara kedua titik tersebut (hati-hati, titik acuan dan kondisi batas harus ditinjau dengan benar). Hubungan-hubungan ini sangat berguna dalam mengecek diagram geser dan momen. Harga momen maksimum atau minimum pada struktur terjadi apabila diagram geser melalui titik nol (karena $dM/dx = 0$ pada titik ini).

2.5 BESARAN MEKANIK MATERIAL

2.5.1 Pendahuluan

Bagian ini membahas berbagai besaran material yang menarik ditinjau dari desain struktural. Beberapa di antaranya adalah kekuatan dan sifat hubungan beban-deformasi dari material. Dalam analisis akhir, besaran-besaran ini dinyatakan dalam gaya-gaya internal yang bekerja di antara bagian-bagian kecil material (yaitu molekul atau, dalam beberapa hal, atom). Akan tetapi, hal tersebut di luar ruang lingkup buku ini. Bagaimana pun, di sini akan dibahas deskripsi mengenai sifat-sifat material tersebut, dan alasan yang mendasari sifat-sifat material tidak dibahas lebih lanjut.

2.5.2 Sifat Beban-Deformasi pada Material Secara Umum

Adanya beban pada elemen struktur selalu menyebabkan terjadinya perubahan dimensional pada elemen struktur tersebut. Struktur tersebut mengalami perubahan ukuran atau bentuk atau kedua-duanya. Pada sebagian besar jenis material, misalnya baja, perubahan dimensional yang terjadi dapat secara kasar dikelompokkan ke dalam dua jenis, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis yang terjadi secara berurutan dengan semakin bertambahnya beban. Apabila elemen struktur tersebut mula-mula dibebani, maka deformasi yang terjadi masih dalam *daerah elastis* dari material. Dalam daerah ini, elemen struktura tersebut masih dapat kembali kepada keadaan semula apabila bebannya dihilangkan (perilaku demikian sama dengan perilaku pegas). Deformasi dalam daerah elastis bergantung langsung pada besar taraf tegangan yang terjadi pada elemen struktur. Apabila bebannya bertambah terus, maka akan terjadi deformasi *yang termasuk ke dalam daerah plastis* dari material. hal ini terjadi apabila tegangan pada material sedemikian besarnya sehingga dapat menyebabkan terjadinya perubahan permanen di dalam struktur internal material. Apabila perubahan internal material ini terjadi, maka keadaan semula tidak dapat tercapai meskipun beban dihilangkan. Dengan demikian, apabila material sudah

1. *F.L.* Singer, *Strength of Materials,* 2nd. ed., Harper & Row, New York, 1962

masuk ke dalam daerah plastis, maka pada material terjadi perubahan dimensi tak dapat balik *(irreversible)* dan terjadi perubahan bentuk yang permanen meskipun bebannya dihilangkan. Taraf beban atau tegangan yang diasosiasikan dengan daerah plastis selalu lebih besar daripada yang diasosiasikan dengan daerah elastis. Dalam daerah plastis, deformasinya tidak berbanding lurus dengan beban atau tegangan yang ada. Deformasi dalam daerah plastis jauh lebih besar daripada dalam daerah elastis, bahkan pada material tertentu dapat terjadi deformasi berlebihan tanpa adanya penambahan beban.

Seperti yang akan dibahas lebih rinci berikut ini, tidak semua material mempunyai perilaku elastis dan plastis apabila bebannya bertambah. Sebagai contoh, baja dapat sedangkan beton polos (plain concrete) tidak.

2.5.3 Elastisitas

Perilaku Elastis. Bagian ini membahas secara lebih rinci perilaku material yang masih berada dalam daerah elastis, yaitu material dapat kembali ke ukuran dan bentuk semula apabila tegangan dihilangkan. Hingga saat ini konsep mengenai tegangan telah banyak dibahas. Cara utama dalam menjelaskan perubahan ukuran dan bentuk adalah dengan menggunakan konsep *regangan* (ϵ). Secara umum regangan didefinisikan sebagai rasio (perbandingan) antara perubahan ukuran atau bentuk suatu elemen yang mengalami tegangan, terhadap ukuran atau bentuk semula (S) elemen [yaitu $\epsilon = \Delta S/(S + \Delta S)$]. Karena merupakan perbandingan, regangan tidak mempunyai dimensi fisis. Ada hubungan umum antara tegangan dan regangan untuk material elastis yang pertama kali dinyatakan oleh Robert Hooke (1635–1703) dan dikenal sebagai *hukum Hooke.* Hukum Hooke ini menyatakan bahwa untuk benda elastis, perbandingan antara tegangan yang ada pada elemen terhadap regangan yang dihasilkan adalah konstan. Jadi:

$$\frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = \text{konstanta untuk suatu material}$$

$$= \text{modulus elastisitas} = E$$

Besar konstanta ini merupakan sifat material dan, seperti telah disinggung di atas, biasanya disebut sebagai *modulus elastisitas.* Satuan untuk konstanta ini sama dengan satuan tegangan (yaitu gaya per satuan luas) karena regangan tidak mempunyai dimensi. Hubungan antara tegangan dan regangan di atas mengandung arti bahwa regangan pada suatu elemen struktur bergantung linear pada tegangan untuk taraf tegangan yang ada. Konstanta yang menghubungkan tegangan dan regangan (modulus elastisitas) ditentukan secara eksperimental.

Apabila elemen struktur mengalami gaya tarik murni, maka elemen struktur tersebut akan mengalami perpanjangan (Gambar 2.29). Jika L menunjukkan panjang semula, dan ΔL adalah perubahan panjang, maka regangan yang ada pada batang tersebut adalah:

$$\text{regangan} = \frac{\text{pertambahan panjang}}{\text{panjang semula}} \quad \text{atau} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Seperti telah disebut di atas, regangan tidak mempunyai dimensi. Kita dapat m
mandang regangan sebagai besar deformasi per satuan panjang. Dengan pengerti
ini, regangan dapat dipandang seolah-olah mempunyai dimensi mm/mm atau in/in.

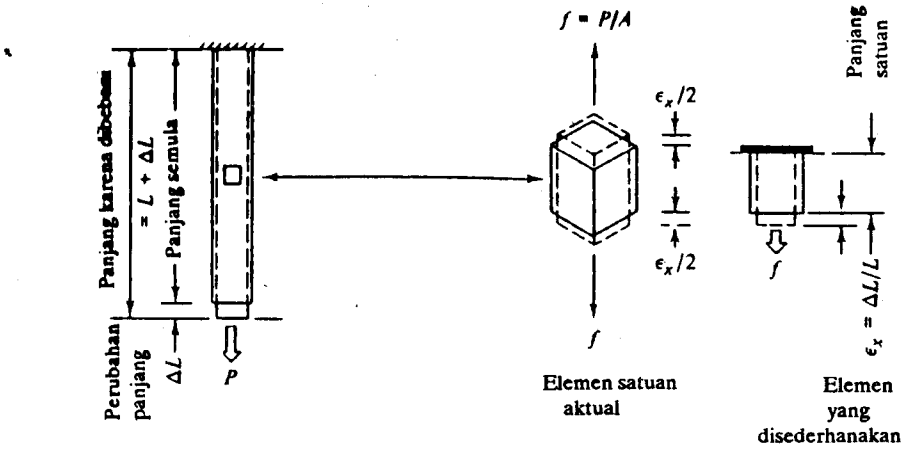
Cara yang biasa dipakai untuk menentukan modulus elastisitas *(E)* mater
adalah dengan menggunakan suatu batang dari material tersebut, yang mempun
panjang serta luas tertentu, kemudian diberi beban yang diketahui, dan mengu
besarnya perpanjangan ΔL. Karena tegangan yang ada dapat secara langsung
hitung dengan menggunakan hubungan $f = P/A$, dan regangan dapat diperoleh d
hubungan $\epsilon = \Delta L/L$, maka modulus elastisitas material tersebut dapat ditentu
dengan menggunakan $E = f/\epsilon$. Modulus elastisitas untuk berbagai material dapat
peroleh dengan prosedur umum seperti ini. Untuk baja (steel), E_S = 29,6 x 1
lb/in^2. (204000 N/mm^2 atau 204000 MPa), dan untuk aluminium, E_a = 11,
10^6 lb/in^2. (77900 N/mm^2). Harga yang umum untuk beton (concrete) adalah
= 3 x 10^6 lb/in^2. (20700 N/mm^2), dan untuk kayu (timber) adalah E_t = 1,6 x 1
lb/in^2. (11000 N/mm^2). Nilai *E* untuk kayu dan beton bergantung pada karakte
tik campuran beton atau mutu dan jenis kayu yang digunakan.

Apabila nilai telah diketahui, *E* dapat dipakai sebagai konstanta dalam memp
diksi deformasi material yang mengalami deformasi akibat berbagai kondisi tegang

Dengan memperhatikan Gambar 2.30 terlihat bahwa modulus elastisitas ada
kemiringan kurva tegangan-regangan di dalam daerah elastis material. Untuk tegan
yang semakin tinggi pada elemen struktur, suatu titik dicapai di mana regangann
akan menjadi tidak bergantung linear lagi terhadap tegangan. Ini adalah titik tran
antara daerah elastis dan plastis untuk material tersebut, atau disebut juga seba
limit proporsional untuk material. Sesudah titik ini dilalui, konsep modulus elas
tas konstan sudah tidak berlaku lagi. Untuk kebanyakan material, seperti baja, be
deformasi yang dapat terjadi di dalam daerah plastis jauh lebih besar dibandingk
dengan di dalam daerah elastis.

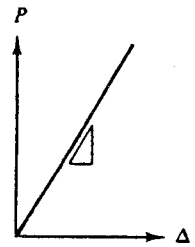
Perlu diingat bahwa beberapa material, seperti aluminium, tidak menunjukk
limit proporsional yang jelas (lihat Gambar 2.31). Bahkan material lain, seperti b
tuang, tidak menunjukkan deformasi plastis sama sekali. Dengan demikian, mate
yang berbeda akan menunjukkan perilaku yang berbeda-beda terhadap beban.

Deformasi Lateral di dalam Daerah Elastis. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.
batang yang diberi beban aksial akan mengalami perubahan elastis dalam dime
lateral selain juga dalam arah longitudinal. Dimensi lateral batang berkurang apab
batang tersebut mengalami beban tarik, dan bertambah apabila batang terseb
mengalami beban tekan. Ada suatu konstanta di antara kedua perubahan lateral
dengan yang terjadi dalam arah longitudinal. Konstanta hubungan ini biasanya
sebut sebagai *angka Poisson (v)* yang didefinisikan sebagai $v = -\epsilon_y/\epsilon_x$. Untuk ba
angka Poisson ini adalah sekitar 0,3.

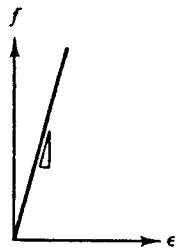


(a) Batang yang dibebani aksial: gaya tarik yang diberikan menyebabkan perpanjangan aksial yang besarnya tergantung pada luas penampang, panjang batang, jenis material, dan besar gaya tarik.

(c) "Regangan" pada batang tarik: regangan adalah besar deformasi per satuan panjang yang terjadi pada batang yang dibebani.

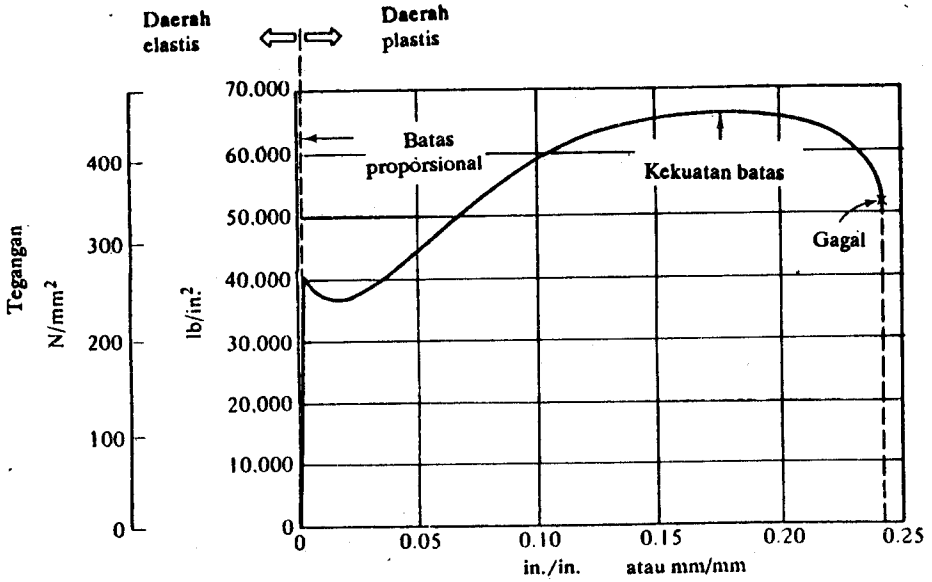


(b) Perilaku elastis : untuk batang yang terbuat dari "material elastis linear" (misalnya baja), besar deformasi yang terjadi sebanding dengan besar beban. Hubungan elastis ini tetap berlaku sampai bebannya cukup besar untuk menghancurkan material

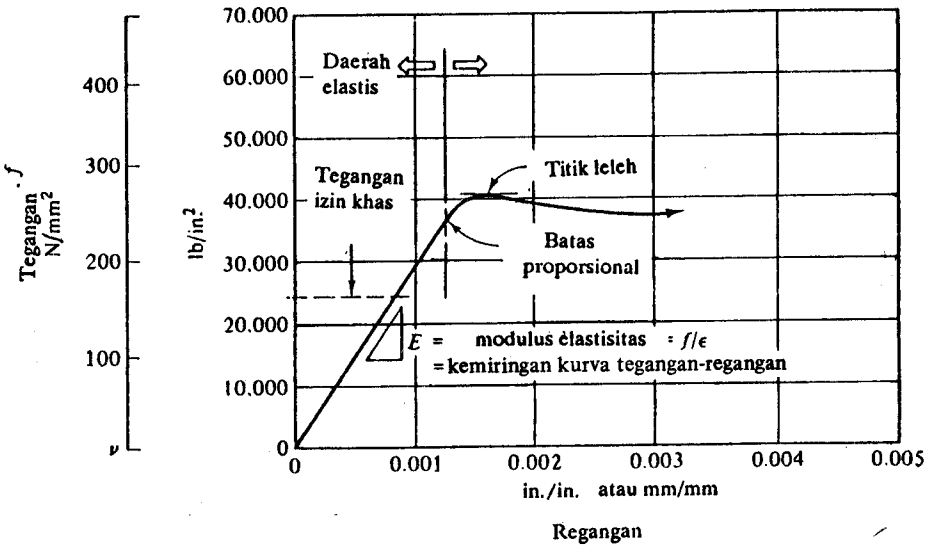


(d) Hubungan antara tegangan dan regangan: pada material elastis linear, ada konstanta yang menghubungkan besar tegangan dan regangan, yaitu tegangan regangan = konstanta = modulus elastisitas (E)

GAMBAR 2.29 Tegangan, regangan, dan perpanjangan pada batang yang mengalami tarik murni.

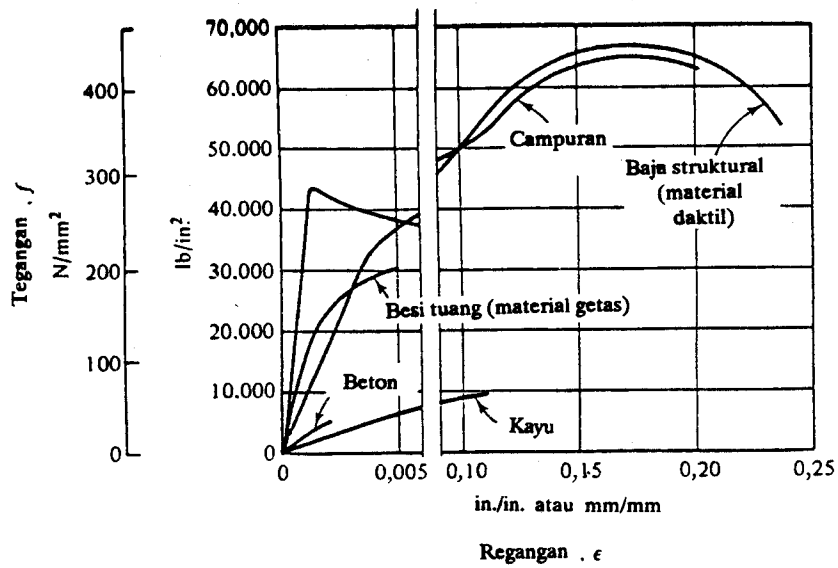


(a) Diagram tegangan-regangan



(b) Daerah elastis yang gambarnya diperbesar

GAMBAR 2.30 Diagram tegangan-regangan tipikal untuk baja struktural yang diuji tarik.



GAMBAR 2.31 Diagram tegangan-regangan untuk berbagai material.

2.5.4 Kekuatan

Sebutan kekuatan sering digunakan sebagai acuan dalam menentukan kapasitas-pikul-beban material. Sebagaimana telah disinggung di atas, material sering kali menunjukkan perilaku yang tidak sederhana apabila dibebani sehingga perlu ada definisi yang lebih tepat untuk menyebut "kekuatan". Sebagai contoh, banyak material dapat terus memikul beban tambahan bahkan setelah limit proporsional material terlampaui. Baja dapat terus memikul taraf tegangan di atas limit proporsional, tetapi disertai deformasi yang sangat berlebihan untuk penambahan tegangan yang sedikit saja. Titik kritis, yang disebut *titik leleh,* dicapai apabila baja berdeformasi tanpa adanya penambahan tegangan sama sekali. Sebenarnya, apabila baja diuji tarik dengan menggunakan mesin-uji-tarik (yang pada umumnya dapat memberi deformasi dan mengukur tegangan atau bebannya, bukan sebaliknya), pengurangan aktual dalam taraf tegangan akan terjadi (lihat Gambar 2.30). Apabila beban diberikan langsung (bukan deformasi), titik leleh dengan mudah akan terlihat dengan adanya pertambahan deformasi secara tiba-tiba. Selanjutnya material akan mengalami deformasi permanen (dalam selang plastis) pada taraf tegangan yang relattif konstan. Akan tetapi, pada saat deformasinya bertambah, baja mulai tidak aman untuk memikul sedikit saja pertambahan beban, dan taraf tegangan yang ada bertambah lagi. Ini adalah yang disebut sebagai *kekuatan batas (ultimate strength)* material. Sesudah tegangan ini tercapai, baja berdeformasi dengan sangat cepat, disertai dengan berkurangnya luas penampang, yaitu terbentuk apa yang disebut *takik (notch),* dan akhirnya *putus.*

2.5.5 Material Daktil (Ductile) versus Getas (Brittle)

Perilaku Daktil dan Getas. Material yang dapat mengalami deformasi plastis seperti yang baru saja dibahas di atas, sampai keadaan sebelum putus biasanya disebut sebagai material *daktil.* Baja adalah contoh klasik dari material daktil. Sebaliknya, apabila material tidak menunjukkan perilaku plastis apabila dibebani, tetapi dapat putus pada saat deformasi yang tidak besar, disebut material *getas (brittle).* Besi tuang adalah material getas, begitu pula beton polos (plain concrete). kurva tegangan-regangan seperti yang terlihat pada Gambar 2.31 menggambarkan perbedaan perilaku yang ada di antara kedua jenis umum material.

Besar daktilitas atau kegetasan yang ada pada material seperti baja secara aktual dapat dikontrol dengan mengatur konsistensi atau metode prosesnya. Dengan menambah kadar karbon di dalamnya, daktilitas akan berkurang. Alternatif lain, baja yang menunjukkan daktilitas kecil dapat semakin daktil dengan menempanya (dipanaskan pada temperatur tinggi dan dibiarkan mendingin secara perlahan-lahan).

Implikasi Daktilitas dalam Desain Struktural. Dari tinjauan desain struktural, material seperti baja yang menunjukkan perilaku daktil atau plastis seperti yang dijelaskan sebelum ini sangat diinginkan karena daerah plastisnya (yaitu adanya sedikit pertambahan kapasitas-pikul-beban di atas titik leleh), memberikan arti sebagai ukuran cadangan kekuatan. Taraf tegangan desain, atau taraf tegangan izin, selalu menggunakan tegangan di bawah tegangan leleh material, dan benar-benar di dalam daerah elastis material. Balok baja, misalnya, akan dirancang agar mempunyai taraf tegangan yang sama atau lebih kecil daripada harga tegangan izin. Taraf tertentu dari defleksi balok elastis adalah sehubungan dengan taraf tegangan tersebut, dan diasosiasikan dengan regangan elastis. Apabila beban pada balok bertambah hingga di atas taraf desain yang diantisipasi, maka taraf tegangan lentur dan regangannya juga bertambah sampai titik leleh material tercapai. Pada saat tersebut baja leleh, tetapi secara fisik belum putus, dan balok mulai mengalami defleksi permanen yang diasosiasikan dengan daerah plastis material. Defleksi ini dengan jelas dapat terlihat dengan mata, dan jauh lebih besar dibandingkan defleksi yang digunakan dalam desain sehingga dapat dipakai sebagai peringatan akan adanya kegagalan. Karena bertambahnya tegangan yang diperlukan untuk mencapai kekuatan batas material, balok masih dapat memikul beban yang sedikit lebih besar sekalipun sudah terjadi defleksi permanen. Hanya apabila kekuatan batas material sudah tercapai, balok tersebut akan gagal. Karena fenomena ini dikaitkan dengan bertambahnya kapasitas-pikul-beban sebagai akibat adanya redistribusi tegangan plastis yang terjadi (lihat Bab 6.3.9), maka balok tersebut mempunyai cadangan kapasitas-pikul-beban yang cukup besar. Dengan demikian, plastisitas material sangat berguna dan merupakan sifat material yang sangat diinginkan.

Material getas tidak menunjukkan perilaku plastis. Elemen struktur yang menggunakan material getas, seperti balok dari besi tuang, tidak dapat berdefleksi secara cukup besar untuk memberi peringatan sebelum terjadinya *collapse.* Elemen struktur demikian cukup berbahaya apabila digunakan.

Beton juga merupakan material yang getas, tetapi apabila digunakan bersama material daktil seperti baja (sebagai tulangannya), material gabungannya (disebut beton bertulang) dapat mempunyai sifat daktil yang ukuran daktailnya dapat direncanakan (lihat Bab 6.3.10).

2.5.6 Sifat Mekanis Lainnya

Efek Laju Regangan. Apabila laju pembebanan pada struktur bertambah, biasanya material yang secara normal daktil mulai berperilaku sebagai material getas (deformasi plastis yang ada hanya sedikit). Limit proporsional dan titik leleh sering kali bertambah apabila laju regangan bertambah.

Efek Temperatur. Temperatur rendah sering kali menyebabkan material yang secara normal daktil, seperti baja, mulai menunjukkan perilaku getas. Dalam banyak hal, efek temperatur rendah pada material sama dengan efek laju regangan tinggi.

Efek Rangkak. Sebutan "rangkak" (creep) di sini dimaksudkan sebagai deformasi terus-menerus dengan bertambahnya waktu untuk suatu keadaan tegangan konstan. Bahan plastik dan beton polos, misalnya, mempunyai kecenderungan demikian, sedangkan baja tidak. Defleksi jangka panjang pada struktur akibat rangkak sering kali cukup besar sehingga tidak dapat diabaikan. Rangkak dapat juga menyebabkan redistribusi tegangan yang tidak diinginkan pada elemen struktur beton bertulang.

Efek Fatik. Material yang mengalami siklus tegangan yang bolak-balik dapat mengalami kegagalan pada tegangan yang relatif rendah (meskipun masih di bawah kekuatan elastis material). Batas daya tahan material adalah tegangan satuan maksimum di mana material dapat menahan tak hingga siklus tanpa mengalami kegagalan. Kebanyakan material yang mengandung *ferrum* (seperti baja) mempunyai limit daya tahan yang terdefinisi dengan baik. Material yang tak mengandung *ferrum,* seperti aluminium, tidak demikian. Pada umumnya fatik (fatigue) bukan merupakan masalah pada gedung karena tidak ada beban dominan yang menyebabkan terjadinya tegangan bolak-balik. Kebanyakan getaran tidak cukup lama untuk menyebabkan masalah fatik.

Efek Pemusatan Tegangan, Retak, dan Cacat. Pada banyak struktur sangat mungkin terjadi retak mikro maupun cacat-cacat lainnya. Pada titik-titik demikian sering timbul tegangan yang sangat tinggi pada luasan yang kecil. Inilah yang disebut *pemusatan* (atau *konsentrasi) tegangan.* Apabila yang digunakan material getas, maka pada titik-titik di mana terjadi pemusatan tegangan terjadi retak yang menjalar terus hingga dapat menyebabkan terjadinya keagagalan pada elemen struktur tersebut. Apabila material daktil yang digunakan, maka material akan berdeformasi sedikit sedikit secara lokal saja sehingga memungkinkan terjadinya redistribusi tegangan. Dengan demikian, retak yang terjadi pada material daktil akan menjalar lebih lambat dibandingkan dengan pada material getas. Karena itulah retak minor yang biasa ada

pada elemen struktur, seperti penampang baja sayap lebar (wide flange), tidak merupakan masalah serius dan tidak banyak pengaruhnya pada kapasitas-pikul-beban elemen struktur tersebut. Hal seperti ini tidak terjadi pada elemen struktur yang getas.

2.6 DEFORMASI PADA BATANG-BATANG TARIK DAN TEKAN

Sering kali kita harus menghitung secara kuantitatif deformasi yang diakibatkan oleh beban eksternal. Untuk batang yang dibebani aksial tarik atau tekan, yang tegangan internalnya terdistribusi secara merata pada penampang melintangnya, perpanjangan atau perpendekan yang terjadi bergantung pada besar beban yang bekerja, luas penampang melintang batang, panjang batang, dan jenis material yang digunakan.

Untuk material yang berperilaku elastis, seperti baja, deformasi yang terjadi pada material yang dibebani aksial sebanding dengan taraf tegangan yang ada, dengan anggapan bahwa semua parameter seperti panjang adalah konstan. Untuk batang tarik dari baja dengan panjang dan luas penampang tertentu, misalnya, beban aksial tertentu akan menyebabkan perpanjangan total tertentu pula pada batang tersebut. Apabila beban itu dikalikan dua, maka perpanjangan yang ada juga dua kali karena taraf tegangannya meningkat dua kali juga.

Deformasi yang ada pada batang yang dibebani aksial dapat dihitung dengan menggunakan fakta bahwa untuk sembarang material elastis, perbandingan tegangan *(f)* yang ada terhadap regangan (ϵ) adalah konstanta [yaitu tegangan/regangan = konstanta = modulus elastisitas *(E)*]. Perpanjangan pada batang tarik dapat diperoleh dengan menentukan regangan yang diasosiasikan dengan tegangan yang ada ($\epsilon = f/E$), kemudian dengan menggunakan perbandingan ini dapat dicari deformasi total yang ada ($\Delta L = \epsilon L$).

CONTOH

Perhatikan batang yang dibebani tarik sederhana yang memikul beban P = 5000 lb (22240 N). Carilah perpanjangan total batang akibat beban tersebut. Asumsikan bahwa batang tersebut dibuat dari baja yang mempunyai modulus elastisitas E = 29,6 x 10^6 lb/in^2. (204000 N/mm^2). Juga anggap bahwa panjang batang tersebut 120 in (3048 mm) dan luas penampang melintangnya 2 in^2. (1290 mm^2).

Solusi:

$$\text{beban} = P = 5000 \text{ lb} = 22240 \text{ N}$$
$$\text{luas} = 2{,}0 \text{ in}^2 = 1290 \text{ mm}^2$$

$$\text{tegangan} = f = \frac{P}{A} = \frac{50000 \text{ lb}}{2{,}0 \text{ in}^2} = 2500 \text{ lb/in}^2$$

$$= \frac{22240 \text{ N}}{1290 \text{ mm}^2} = 17{,}24 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{regangan} = \epsilon = \frac{f}{E} = \frac{2500 \text{ lb/in}^2}{29{,}6 \times 10^6 \text{ lb/in}^2} = 0{,}0000845 \text{ in./in.}$$

$$= \frac{17{,}24 \text{ N/mm}^2}{2040000 \text{ N/mm}^2} = 0{,}0000845 \text{ mm/mm}$$

$$\text{perpanjangan} = \Delta L = \epsilon L = 0{,}0000845 \text{ (120 in.)}$$
$$= 0{,}0101 \text{ in.}$$
$$= 0{,}257 \text{ mm}$$

Perhatikan bahwa besar regangan maupun perpanjangan total adalah angka yang relatif sangat kecil. Apabila batang yang sama terbuat dari aluminium yang mempunyai modulus elastisitas E = 11,3 x 10^6 lb/in^2. (77900 N/mm^2), maka regangan dan perpanjangannya akan bertambah. Dengan demikian:

$$\text{regangan} = \epsilon = \frac{f}{E} = \frac{2500 \text{ lb/in}^2}{11{,}3 \times 10^6 \text{ lb/in}^2} = 0{,}000221 \text{ in./in.}$$

$$= \frac{17{,}24 \text{ N/mm}^2}{77500 \text{ N/mm}^2} = 0{,}000221 \text{ mm/mm}$$

$$\text{perpanjangan} = \Delta L = \epsilon L = 0{,}000221 \text{ (120 in.)} = 0{,}0265 \text{ in.}$$
$$= 0{,}000221 \text{ (3048 mm)} = 0{,}67 \text{ mm}$$

Alih-alih menghitung tegangan dan regangan dulu untuk mencari perpanjangan, kita dapat menggunakan satu persamaan dalam menentukan perpanjangan batang akibat beban aksial, yaitu apabila beban P, panjang batang L, luas penampang A, dan modulus elastisitas E, maka:

Persamaan ini sering digunakan dalam analisis dan desain struktural. Jelas terlihat bahwa perpanjangan pada batang yang dibebani aksial bergantung linear pada beban yang ada dan panjang batang serta berbanding terbalik pada luas penampang dan modulus elastisitas.

CONTOH

Carilah perpanjangan yang diakibatkan oleh gaya 7500 lb (33360 N) pada batang baja berukuran panjang 144 in. (3658 mm) dan mempunyai luas penampang melintang 0,785 in^2. (506,5 mm^2). Gunakan E baja = 29,6 lb/in^2. (204 N/mm^2).

Solusi:

$$\Delta L = \frac{PL}{EA} = \frac{(7500 \text{ lb})(144 \text{ in.})}{(0{,}785 \text{ in}^2)(29{,}6 \times 10^6 \text{ ln})}$$

$$= 0{,}046 \text{ in.}$$

$$= \frac{9(33360 \text{ N})(3658 \text{ mm})}{(506{,}5 \text{ mm}^2)(204000 \text{ N/mm}^2)}$$

$$= 1{,}18 \text{ mm}$$

SOAL

2–1. Sebuah gaya P yang didefinisikan dengan sudut $\theta_x = 75°$ terhadap sumbu x bekerja melalui sebuah titik. Apakah komponen gaya tersebut pada sumbu x dan y?
Jawaban: $P_x = 0{,}26P, P_y = 0{,}97P$.

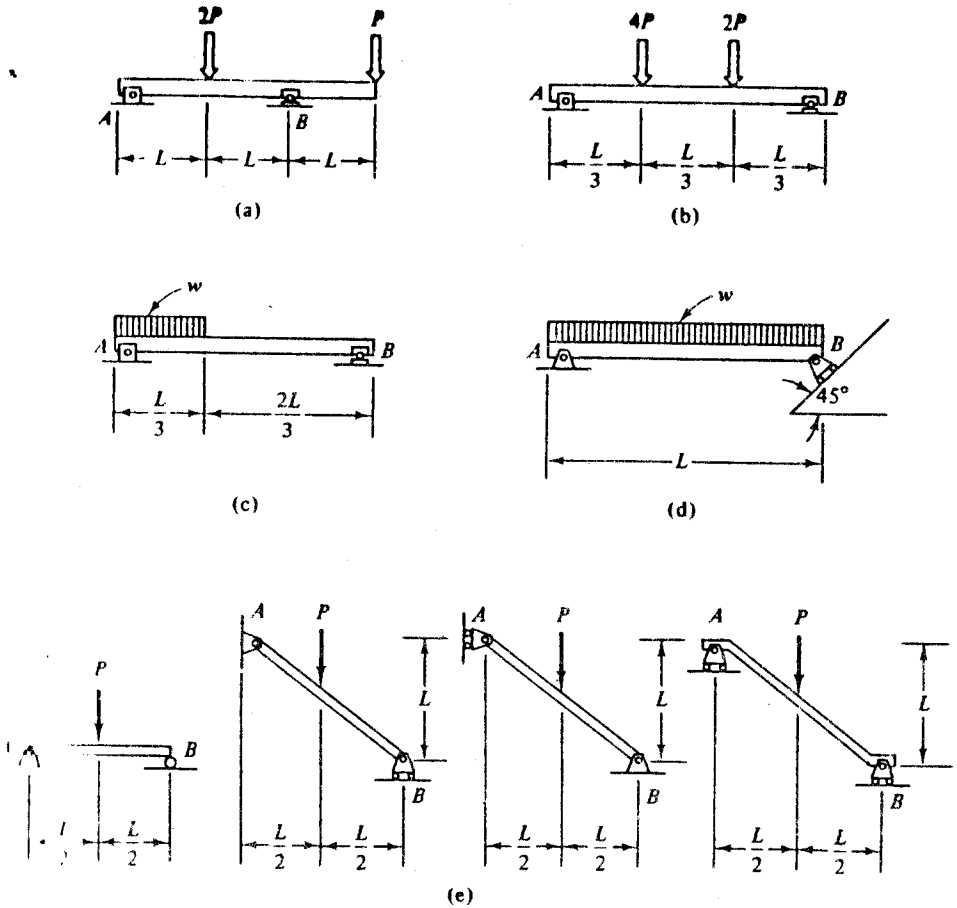
2–2. Komponen-komponen sebuah gaya pada sumbu x dan y berturut-turut adalah $0{,}50P$ dan $1{,}50P$. Berapa besar dan ke mana arah gaya tersebut?
Jawaban: $1{,}58P$ dengan sudut $\theta = 71{,}5°$.

2–3. Ketiga gaya berikut ini adalah gaya-gaya yang konkuren: gaya P yang bekerja dengan sudut $\theta_x = 30°$ terhadap horizontal, gaya P yang bekerja dengan sudut $\theta_x = 45°$ terhadap horizontal, dan gaya P yang bekerja dengan sudut 60° dengan horizontal. Carilah resultan sistem ketiga gaya tersebut.
Jawaban: $2{,}83P$ dengan sudut 45°.

2–4. Ketiga gaya berikut ini bekerja melalui sebuah titik P (bersudut $\theta_x = 45°$), $2P$ (bersudut $\theta_x = 180°$), dan P (bersudut $\theta_x = 270°$), Carilah resultannya.
Jawaban: $1{,}33P$ (bersudut 192,8°.

2–5. Tentukan reaksi pada struktur seperti yang terlihat pada gambar 2.32(a).
Jawaban; $R_{Av} = P/2 \uparrow$ dan $R_{Bv} = 5P/2 \uparrow$.

2–6. Tentukan reaksi untuk struktur seperti yang terlihat pada gambar 2.32(b).
Jawaban: $R_{Av} = 10P/3 \uparrow$ dan $R_{Bv} = 8P/3 \uparrow$.



GAMBAR 2.32 Soal-soal.

7. Tentukan reaksi untuk struktur seperti yang terlihat pada gambar 2.32(c).
Jawaban: $R_{Av} = 5wL/18 \uparrow$ dan $R_{Bv} = wL/18 \uparrow$.

8. Tentukan reaksi untuk struktur seperti yang terlihat pada gambar 2.32(d).
Jawaban: $R_{Av} = wL/2 \uparrow$, $R_{Ah} = wL/2 \rightarrow$,
$R_{Bv} = wL/18 \uparrow$ dan $R_{Bh} = wL/2 \leftarrow$.

9. Tentukan reaksi untuk keempat balok seperti yang terlihat pada Gambar 2.32(e). Perhatikan bahwa ketiga elemen struktur miring adalah identik kecuali kondisi tumpuannya yang berbeda.
Jawaban: $R_A = P/2 \uparrow$, $R_B = P/2 \uparrow$; $R_{Av} = P/2 \uparrow$, $R_{Ah} = 0$, $R_{Bv} = P/2 \uparrow$, $R_{Bh} = 0$; $R_{Av} = 0$, $R_{Ah} = P/2 \rightarrow$, $R_{Bv} = P \uparrow$, $R_{Bh} = P/2 \leftarrow$; $R_{Av} = P/2 \uparrow$, $R_{Ah} = 0$, $R_{Bv} = P/2 \uparrow$, $R_{Bh} = 0$.

2–10. **Gambarlah diagram geser dan momen untuk balok yang telah dianalisa** dalam Soal 2.5. Berapakah gaya geser maksimum yang ada? Berapakah momen lentur maksimum yang ada?
Jawaban: $V = -3P/2, M = -PL$.

2–11. Gambarlah diagram geser dan momen untuk balok yang telah dianalisa dalam Soal 2.6. Berapakah gaya geser maksimum yang ada? Berapaka momen lentur maksimum yang ada?
Jawaban: $V = +10P/3, M = 10PL/9$.

2–12. Gambarlah diagram geser dan momen untuk balok yang telah dianalisa dalam Soal 2.7. Berapakah gaya geser maksimum yang ada? Berapaka momen lentur maksimum yang **ada?**
Jawaban: $V = +5wL/18, M = 25wL^2/648$.

2–13. Gambarlah diagram geser dan momen untuk balok yang telah dianalisa dalam Soal 2.8. Berapakah gaya geser maksimum yang ada? Berapaka momen lentur maksimum yang ada?
Jawaban: $V = \pm wL/2, M = wL^2/8$.

2–14. Gamlarlah diagram geser dan momen untuk balok yang telah dianalisa dalam Soal 2.9. Untuk elemen struktur miring ini diagram momen dan gese sebaiknya digambar terhadap sumbu longitudinal balok. Jadi, kompone transversal dari beban dan gaya reaksi harus diperhitungkan dalam penen tuan geser dan momen. Bandingkan momen maksimum yang ada pad semua balok. Diskusikanlah.

2–15. Carilah pada berbagai sumber bacaan, besar modulus elastisitas untuk ber bagai material, sedikitnya dua (misalnya *plexiglass* dan *polyvinylchloride).*

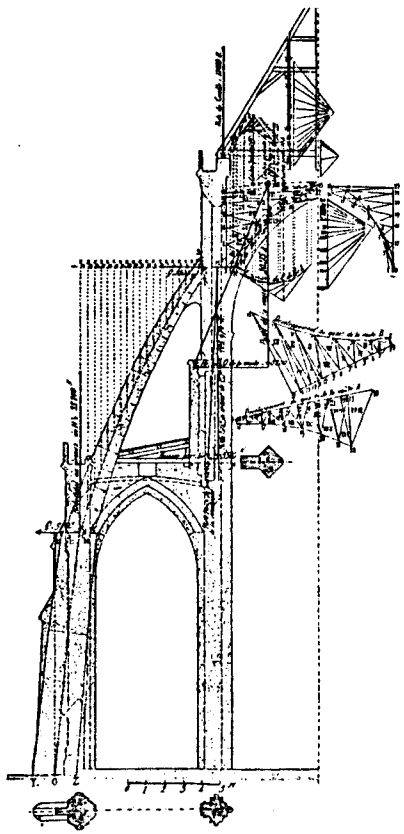
2–16. Berapakah regangan yang ada pada benda uji aluminium yang dibeba hingga mengalami tegangan 10000 lb/in^2? Asumsikan bahwa $E_a = 11{,}3 \times 10^6$ lb/in^2.
Jawaban: 0,0000885 in./in.

2–17. Berapakah regangan yang terjadi pada benda uji baja yang dibebani hingg mengalami tegangan 24000 lb/in^2. ? Asumsikan bahwa $E_s = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in^2.
Jawaban ; 0,0000811 in./in.

2–18. Sebuah batang baja bujursangkar yang berukuran 2 in. x 2 in. dan mem punyai panjang 20 ft dibebani tarik sebesar 16000 lb. Berapakah perpan jangan batang tersebut? Asumsikan bahwa $E_s = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in^2.
Jawaban : 0,032 in.

2–19. **Sebuah batang baja berdiameter 29 mm dan mempunyai panjang 5 m dibebani tarik sebesar 20,4 kN. Berapakah perpanjangannya? Asumsikan bahwa $E_s = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in^2.**
Jawaban: 1,56 mm.

2–20. **Pelajari baik-baik bagaimana teknik statika secara grafis dapat dipakai dalam menganalisis struktur *gothic.*** Contoh yang sangat rumit mengenai analisis ini terlihat pada Gambar 2.33. Carilah literatur di perpustakaan. Lihat misalnya referensi Jacques Heyman, "The Stone Skeleton", *International Journal of Solids and Structures,* Vol. 2, 1966, 249–279; dan William Wolfe, *Graphical Analysis: A Text Book on Graphic Statics,* 1st. ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1921.



GAMBAR 2.33 Potongan St. Ouen.

BAB 3

PENDAHULUAN UNTUK ANALISIS DAN DESAIN

3.1 KRITERIA DESAIN DAN ANALISIS

Bab ini memberikan pendahuluan untuk analisis dan desain struktur dalam kontek gedung. Untuk melakukan analisis maupun desain suatu struktur perlu ditetapka kriteria yang dapat digunakan sebagai ukuran maupun untuk menentukan apaka struktur tersebut dapat diterima untuk penggunaan yang diinginkan atau untu maksud desain tertentu. Kriteria-kriteria lain yang penting akan dibahas sebaga berikut.

3.1.1 Kemampuan Layan (Serviceability)

Struktur harus mampu memikul beban rancang secara aman – tanpa kelebiha tegangan pada material dan mempunyai deformasi yang masih dalam daerah yan diizinkan. Kemampuan suatu struktur untuk memikul beban tanpa ada kelebiha tegangan diperoleh dengan menggunakan faktor keamanan dalam desain eleme struktur. Dengan memilih ukuran serta bentuk elemen struktur dan bahan yan digunakan, taraf tegangan pada struktur dapat ditentukan pada taraf yang dipandan masih dapat diterima secara aman, dan sedemikian hingga kelebihan tegangan pad material (misalnya ditunjukkan dengan adanya retak) tidak terjadi. Pada dasarny inilah *kriteria kekuatan* dan merupakan dasar yang sangat penting.

Aspek lain mengenai kemampuan layan suatu struktur adalah mengenai defo masi yang diakibatkan oleh beban, apakah masih dalam batas yang dapat diterim atau tidak. Deformasi berlebihan dapat menyebabkan terjadi kelebihan tegangan pada suatu bagian struktur. Selain itu, karena deformasi berlebihan tampak jela

dengan mata, sering tidak diinginkan terjadi. Perlu diperhatikan bahwa karena struktur berubah bentuk secara berlebihan, tidak harus berarti struktur tersebut tidak stabil. Defleksi atau deformasi besar dapat diasosiasikan dengan struktur yang tidak aman, tetapi hal ini tidak selalu demikian. Deformasi dikontrol oleh *kekakuan* struktur. Kekakuan sangat bergantung pada jenis, besar, dan distribusi bahan pada struktur. Sering kali diperlukan elemen struktur yang lebih banyak untuk mencapai kekakuan yang diperlukan daripada untuk memenuhi syarat kekuatan struktur.

Berkaitan dengan deformasi, tetapi bukan merupakan fenomena yang sama, adalah *gerakan* pada struktur. Pada banyak situasi, kecepatan dan percepatan aktual struktur yang memikul beban dinamis dapat dirasakan oleh pemakai bangunan, dan dapat menimbulkan rasa tidak nyaman. Salah satu contoh adalah gerakan sehubungan dengan gedung bertingkat banyak yang mengalami beban angin. Untuk itu ada kriteria mengenai kecepatan dan percepatan batas. Kontrol tercapai dengan melalui manipulasi yang melibatkan kekakuan struktur dan karakteristik redaman.

3.1.2 Efisiensi

Kriteria ini mencakup juga tujuan desain struktur yang relatif lebih ekonomis. Ukuran yang sering digunakan adalah banyak material yang diperlukan untuk memikul beban yang diberikan dalam ruang pada kondisi dan kendala yang ditentukan. Mungkin saja terjadi bahwa respons struktur yang berbeda-beda terhadap situasi beban yang diberikan akan mempunyai kemampuan layan yang sama. Akan tetapi, ini tidak selalu berarti bahwa setiap struktur akan memerlukan material yang sama untuk memberikan kemampuan layan yang sama. Mungkin terjadi satu solusi akan memerlukan material lebih sedikit dibandingkan dengan yang lain. Penggunaan volume minimum sebagai kriteria adalah salah satu dari berbagai konsep penting bagi arsitek maupun rekayasawan yang akan digunakan dalam buku ini. Ukuran lain efisiensi dapat juga ditentukan tersendiri

3.1.3 Konstruksi

Tinjauan konstruksi sering juga mempengaruhi pilihan struktural. Sangat mungkin terjadi bahwa perakitan elemen-elemen struktural akan efisien apabila materialnya mudah dibuat dan dirakit. Kriteria konstruksi sangat luas, dan termasuk juga ke dalamnya tinjauan mengenai banyak serta jenis usaha atau *manpower* yang diperlukan untuk melaksanakan suatu bangunan, juga jenis dan banyak alat yang diperlukan serta lama waktu penyelesaiannya.

Faktor umum yang mempengaruhi kemudahan pelaksanaan suatu fasilitas adalah kerumitan fasilitas tersebut yang dinyatakan dalam banyak bagian yang terlibat dan derajat relatif usaha yang diperlukan untuk merakit bagian-bagian tersebut sehingga menjadi suatu struktur secara utuh. Ukuran, bentuk, serta berat setiap bagian juga penting karena jenis alat yang diperlukan untuk melaksanakannya ditentukan oleh masing-masing. Pada umumnya perakitan yang melibatkan bagian-bagian yang bentuk serta ukurannya mudah dikelola dengan peralatan konstruksi yang tersedia adalah

hal yang dikehendaki. Sekalipun hal ini penting, kemudahan pelaksanaan tidak dibahas secara mendalam dalam buku ini.

3.1.4 Harga

Harga selalu merupakan faktor yang menentukan dalam pemilihan struktur. Konsep harga tidak dapat dilepaskan dari dua hal yang telah dibahas sebelum ini, yaitu efisiensi bahan dan kemudahan pelaksanaan. Harga total suatu struktur sangat bergantung pada banyak dan harga material yang dipakai serta banyak dan upah buruh yang diperlukan untuk melaksanakan suatu fasilitas, juga harga atau biaya alat yang diperlukan selama pelaksanaan. Tentu saja, struktur yang sangat efisien yang tidak sulit dilaksanakan akan merupakan yang paling ekonomis. Buku ini tidak membahas lebih dalam mengenai harga dan biaya.

3.1.5 Lain-lain

Tentu saja ada berbagai faktor lain yang mempengaruhi pemilihan struktur. Dibandingkan dengan kriteria yang relatif terukur dan objektif yang telah dibahas di atas, banyak faktor tambahan yang relatif lebih subjektif. Yang tidak kurang pentingnya ialah peran struktur karena dalam pandangan arsiteknya struktur merupakan bagian besar dari penampilan bangunan. Sekalipun sangat menarik untuk dipelajari lebih dalam, masalah tersebut berada di luar ruang lingkup buku ini.

3.1.6 Kriteria Berganda

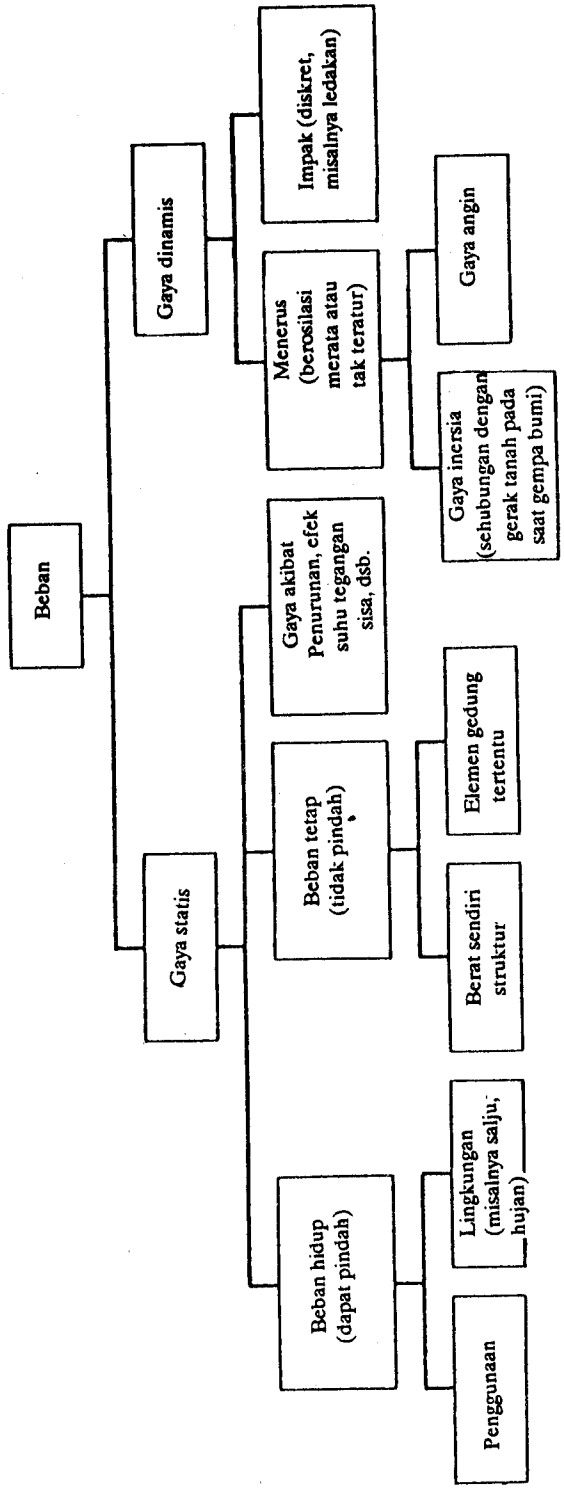
Jarang sekali suatu struktur hanya ditujukan untuk memenuhi salah satu kriteria yang telah dibahas di atas. Konsep *serviceability* (kemampuan layan) dan faktor keamanan yang dilibatkannya, bagaimana pun, merupakan hal yang biasa berlaku pada semua struktur. Dengan demikian, faktor tersebut merupakan tanggung jawab utama seorang perancang struktur. Kriteria lain dapat saja dilibatkan, tetapi *serviceability* harus *selalu* dilibatkan.

3.2 BEBAN-BEBAN PADA STRUKTUR

3.2.1 Pendahuluan

Dalam melakukan analisis desain suatu struktur, perlu ada gambaran yang jelas mengenai perilaku dan besar beban yang bekerja pada struktur. Gambar 3.1 mengilustrasikan dengan diagram beban-beban yang harus diperhatikan dan cara menentukan karakteristiknya.

Hal penting yang mendasar adalah pemisahan antara beban-beban yang bersifat statis dan dinamis. Gaya *statis* adalah yang bekerja secara perlahan-lahan pada struktur dan mempunyai karakter *steady-state*. Deformasi resultan pada struktur yang diasosiasikan dengan gaya-gaya ini juga secara perlahan-layan timbul, dan juga



GAMBAR 3.1 Jenis kondisi pembebanan.

mempunyai karakter *steady-state.* Deformasi ini akan mencapai puncaknya apabila gaya statis telah maksimum. Gaya *dinamis* adalah yang bekerja secara tiba-tiba pada struktur. Pada umumnya tidak bersifat *steady-state* dan mempunyai karakteristik besar dan lokasinya berubah dengan cepat. Deformasi pada struktur akibat beban ini juga berubah-ubah dengan cepat. Gaya dinamis dapat menyebabkan terjadinya osilasi pada struktur hingga deformasi puncak tidak terjadi bersamaan dengan terjadinya gaya terbesar.

3.2.2 Gaya-gaya Statis

Beban Mati. Gaya-gaya statis pada umumnya dapat dibagi lagi menjadi beban mati, beban hidup, dan beban akibat penurunan atau efek termal.

Beban mati adalah beban-beban yang bekerja vertikal ke bawah pada struktur dan mempunyai karakter yang pasti. Berat sendiri struktur adalah beban mati. Berat sendiri komponen bangunan, seperti misalnya penutup lantai, alat mekanis, partisi yang tak dapat dipindahkan, adalah beban mati. Berat eksak elemen-elemen ini pada umumnya diketahui atau dapat dengan mudah ditentukan dengan derajat ketelitian cukup tinggi. Semua metode untuk menghitung beban mati suatu elemen didasarkan atas peninjauan berat satuan material yang terlibat dan berdasarkan volume elemen tersebut. Berat satuan *(unit weight)* material secara empiris ditentukan dan telah banyak dicantumkan tabelnya dalam berbagai sumber untuk memudahkan perhitungan beban mati. Volume suatu material biasanya dapat dihitung, tetapi kadang kala merupakan pekerjaan yang berulang dan membosankan. Informasi mengenai berbagai berat satuan berbagai material yang sering digunakan pada bangunan untuk perhitungan beban mati dicantumkan berikut ini.

Tabel 3.1. Berat Satuan Rata-rata Berbagai Material

Material	lb/ft^3	kg/m^3
Logam		
Aluminium, tuang	165	2643
Tembaga, tuang	556	8907
Timbal	710	11374
Baja, giling	490	7849
Masonry		
Beton, polos		
Agregat batu	144	2307
Agregat ringan	75–100	1201–1762
Beton, bertulang		
Agregat batu	150	2402
Brick (bata)	100–130	1602–2083
Bumi		
Lempung, kering	63	1009
Lempung, lembab	110	1762
Bumi, kering	75–95	1201–1521
Bumi, basah	80–100	1281–1602
Lain-lain		
Kaca, umum	156	2499
Kaca, pelat	161	2579
Pitch	69	1105
Tar	75	1202

Beban Hidup. Beban hidup adalah beban-beban yang bisa ada atau tidak ada pada struktur untuk suatu waktu yang diberikan. Meskipun dapat berpindah-pindah, beban hidup masih dapat dikatakan bekerja secara perlahan-lahan pada struktur. Beban penggunaan (occupancy loads) adalah beban hidup. Yang termasuk ke dalam beban penggunaan adalah berat manusia, perabot, material yang disimpan, dan sebagainya. Beban salju juga termasuk ke dalam beban hidup. Semua beban hidup mempunyai karakteristik dapat pindah atau bergerak. Secara khas beban ini bekerja vertikal ke bawah, tetapi kadang-kadang dapat berarah horizontal.

Tabel 3.2. Beban Rata-rata Komponen Konstruksi

Komponen	lb/ft^2	kg/m^2 [a]	N6m2b
Atap			
Aspal	2,0	9,8	95,8
Asbes semen	4,0	19,5	191,5
Komposisi atap			
3 *ply* dan kerikil	5,5	26,8	263,3
5 *ply* dan kerikil	6,5	31,8	311,2
Corrugated metal			
Standar Amerika 20	1,7	8,3	81,4
Ukuran Amerika 25	0,8	3,9	38,4
Dek *plank* beton			
(per inci tebal)	6,5	31,8	311,2
Insulasi, serat kaca			
kaku	1,5	7,3	71,8
Lumber sheathing (1 in.)	2,5	12,2	119,7
Plywood sheathing (1 in.)	3,0	14,6	143,6

Lantai			
Lantai beton, agregat batu (per in. tebal)	12,0	58,6	574,6
Kayu keras (1 in.)	4,0	19,5	191,5
Plank beton berlubang (tebal 6 in.)	45–50	220–244	2155–2394
Linoleum (¼ in.)	1,0	4,9	47,9
Plywood (1 in.)	3,0	14,6	143,6
Dek baja	2–10	10–49	96–480
Dinding			
Brick (bata)			
(4 in.)	40	195,3	1915,2
(8 in.)	80	396,6	3838,4
Blok beton berlubang			
Agregat berat			
(4 in.)	30	146,5	1436,4
(8 in.)	55	268,5	2633,4
Agregat ringan			
(8 in.)	38	185,5	1819,4
Stud kayu (2x4, 16 in.)			
Jendela	8	39,1	383,0

a. Sistem metrik konvensional
b. Sistem SI

Beban angin dan gempa, yang akan dibahas tersendiri, adalah bentuk khusus beban hidup yang secara khas ditinjau terpisah karena aspek-aspek dinamisnya. Cukup jelas bahwa memprediksi secara eksak berapa besar dan distribusi beban hidup adalah hal yang sangat sulit. Oleh karena itu, dapat digunakan pendekatan empiris mengenai besar dan perilaku beban untuk berbagai jenis penggunaan. Dari data statistik, beban yang ekuivalen dengan beban tersebut dinyatakan per satuan luas dan dapat dipakai untuk merancang. Kadang-kadang dapat juga ada beban terpusat. Beban ekuivalen ini pada umumnya merefleksikan suatu angka yang menunjukkan efek total semua beban yang dapat berpindah dan mempunyai arah vertikal, yang diasosiasikan dengan penggunaan tertentu. Biasanya merupakan kombinasi yang diharapkan maksimum dari beban-beban penggunaan yang mungkin harus dipikul oleh struktur. Pada penentuan besar beban penggunaan tersebut sudah disertai asumsi tertentu mengenai frekuensi terjadinya.

Beban hidup aktual pada struktur pada sembarang waktu pada umumnya lebih kecil daripada besar beban yang dirancang pada struktur. Akan tetapi, pada suatu waktu besar kemungkinan beban yang bekerja itu sama dengan beban rencana pada struktur. Jelaslah bahwa struktur yang sudah direncanakan untuk penggunaan tertentu harus dicek kembali apabila akan dipakai untuk penggunaan lain. Sebagai contoh, struktur yang semula direncanakan untuk apartemen akan tidak cukup kuat apabila diganti penggunaannya menjadi gudang atau kantor.

Tabel 3.3. Beban Hidup Terdistribusi Merata

Penggunaan	lb/ft²	kg/m²	N/m²
Apartemen, perumahan banyak keluarga:			
Koridor	80	391	3830
Apartemen pribadi	40	195	1915
Ruang umum	100	486	4788
Hall			
Tempat duduk tetap	60	293	2873
Tempat duduk dapat pindah	100	488	4788
Ruang dansa	100	488	4788
Garasi umum	100	488	4788
Ruang olah raga	100	488	4788
Hotel			
Koridor	100	488	4788
Ruang tamu	40	195	1915
Ruang umum	100	488	4788
Perpustakaan			
Ruang baca	60	293	2873
Penyimpanan	150	732	7182
Pabrik	125	610	5985
Gedung kantor			
Kantor	60	293	2873
Lobby	100	488	4788
Rumah tinggal			
Lantai pertama	40	195	1915
Lantai kedua	30	146	1436
Sekolah			
Ruang kelas	40	195	1915
Koridor	80	391	3830
Tangga	100	488	4788
Toko			
Lantai pertama	100	488	4788
Lantai di atasnya	75	366	3591
Teater			
Koridor, ruang samping	100	488	4788
Balkon	60	293	2873
Lantai	60	293	2873
Lantai pertunjukan	150	732	7182

Tabel 3.4. Beban Salju Khas

Daerah	lb/ft²	N/m²
Daerah selatan	0–15	0–718
Daerah tengah	25–35	1197–1676
Daerah utara	30–550	1436–2394
Great Lakes, New England, dan daerah pegunungan	30–80	1436–3830

Tabel 3.3 mengilustrasikan beban-beban hidup ekuivalen yang direkomendasikan untuk beberapa jenis penggunaan. Peraturan-peraturan pada umumnya mensyaratkan struktur direncanakan terhadap beban seperti pada tabel tersebut. Angka-angka yang dicantumkan pada tabel tersebut hanya ilustrasi, dan sebaiknya tidak begitu saja digunakan karena besarnya harus disesuaikan dengan peraturan yang berlaku setempat untuk bangunan.

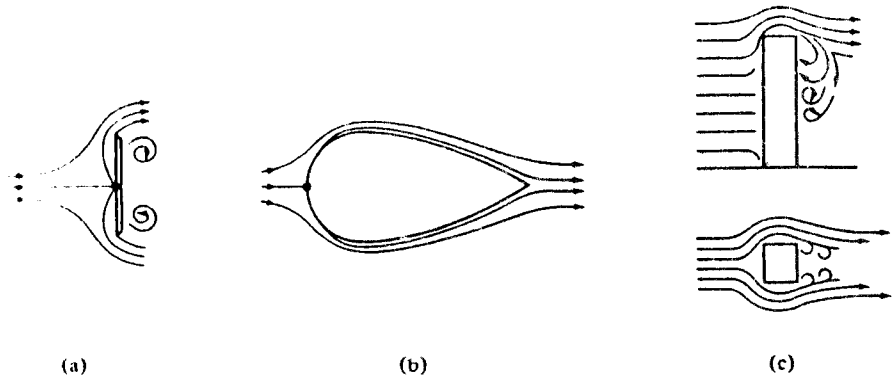
Beban Salju. Beban salju pada atap sangat bervariasi dan bergantung pada faktor-faktor seperti ketinggian, garis lintang, frekuensi angin, lama salju jatuh, terpaan salju setempat, ukuran atap, geometri, dan kemiringannya. Sebagai pedoman, berat salju adalah sekitar 0,5 sampai 0,6 lb/ft² per in. tebal salju.

Angka ini dapat sangat berubah, bergantung pada kepadatan salju. Kebanyakan desain beban salju bervariasi antara 20 dan 60 lb/ft² (958 dan 2873 N/m²) (lihat Tabel 3.4). Pengalaman setempat juga harus selalu dicek karena untuk tempat tertentu dapat terjadi besar beban salju yang melebihi angka tersebut. Hal ini benar, khususnya untuk daerah pegunungan yang dapat mencapai 250 sampai 300 lb/ft².

3.2.3 Beban Angin

Efek Statis Angin. Struktur yang berada pada lintasan angin akan menyebabkan angin berbelok atau dapat berhenti. Sebagai akibatnya, energi kinetik angin akan berubah bentuk menjadi energi potensial yang berupa tekanan atau isapan pada struktur. Besar tekanan atau isapan yang diakibatkan oleh angin pada suatu titik bergantung pada kecepatan angin, rapat massa udara, lokasi yang ditinjau pada struktur, perilaku permukaan struktur, bentuk geometris, dimensi dan orientasi struktur, dan kekakuan keseluruhan struktur.

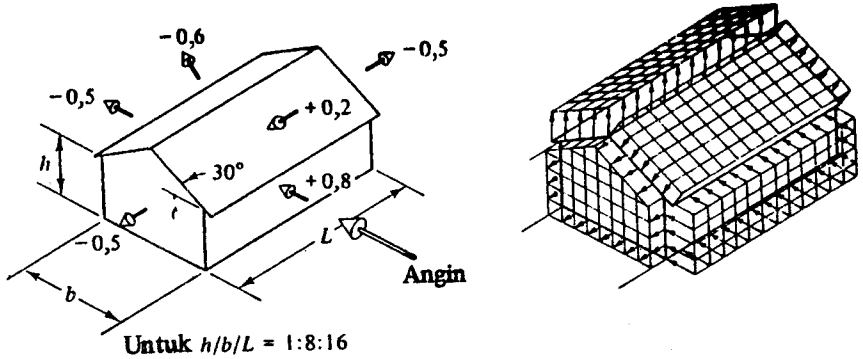
Apabila suatu fluida seperti udara mengalir di sekitar suatu benda, akan terjadi pola arus kompleks di sekitar benda tersebut. Perilaku dan kerumitan pola aliran itu bergantung pada bentuk benda. Aliran dapat laminer, dapat pula turbulen. Gaya yang bekerja pada benda sebagai hasil dari gangguan pada aliran tersebut dapat berupa tekanan atau isapan. Semakin langsing suatu benda, akan semakin kecil gaya reaksi yang diberikannya dalam arah berlawanan dengan arah angin bergerak. Gambar 3.2 mengilustrasikan aliran udara di sekitar beberapa benda secara diagram.



GAMBAR 3.2 Aliran di sekitar beberapa bentuk.

Salah satu faktor yang mempengaruhi besar gaya yang ada pada saat udara bergerak di sekitar benda adalah kecepatan angin. Kecepatan angin rencana untuk berbagai lokasi geografis ditentukan dari observasi empiris Kecepatannya sekitar 60 mph (96 km/jam) sampai sekitar 100 mph (161 km/jam) dan di daerah pantai sekitar 120 mph (193 km/jam). Kecepatan rencana biasanya didasarkan atas periode 50 tahun. Karena kecepatan angin akan semakin tinggi dengan ketinggian di atas tanah, maka tinggi kecepatan rencana juga demikian. Selain itu perlu juga diperhatikan apakah bangunan itu terletak di perkotaan atau di pedesaan. Analisis yang lebih rumit juga memasukkan faktor respons-embusan yang merupakan fungsi dari ukuran dan tinggi struktur, kekasaran permukaan, dan benda-benda lain di sekitar struktur. Peraturan bangunan lokal harus diperhatikan untuk menentukan beban angin atau kecepatan rencananya.

Seandainya kecepatan angin telah diketahui, tekanan dinamis angin yang bekerja dapat ditentukan dan dinyatakan dalam gaya statis ekuivalen. Tekanan dinamis angin dapat ditentukan dengan menerapkan *persamaan Bernoulli* untuk aliran fluida yang sudah sangat terkenal. Persamaan ini berbentuk $q = \frac{1}{2} \rho V^2$ di mana q adalah tekanan dinamis, ρ adalah rapat massa udara, dan V adalah kecepatan angin. Untuk udara standar (biasanya didefinisikan sebagai 0,0765 lb/ft³), *tekanan kecepatan dalam* per ft² pada ketinggian h adalah $q_h = 0{,}08256\ V_h^2$ di mana V_h dinyatakan dalam mil per jam. Konversi gaya ini menjadi gaya statis adalah dengan menggunakan koefisien tekanan C_D yang bergantung pada geometri benda yang dilalui angin. Gaya reaktif F_D yang dikeluarkan oleh struktur dalam arah berlawanan dengan gerak angin dapat diperoleh dengan menggunakan koefisien tekanan dan ekspresi tekanan dinamis. Jadi, $F_D = C_D q_h A$ di mana C_D adalah koefisien tekanan untuk bentuk tertentu, qh adalah tekanan kecepatan pada tinggi h, dan A adalah luas permukaan bangunan tegak lurus terhadap angin. Ekspresi lebih eksak selalu memasukkan penggunaan faktor hembusan G_F. Jadi, $F_D = C_D q_h A G_F$. Dengan menggunakan ekspresi tunggal, tekanan statis *rata-rata p diberikan oleh* $p = F_D/A$ atau $p = C_D q_h$. Ekspresi terakhir inilah yang sering digunakan.



Gaya angin = $C_d q_h A$

C_d = koefisien tekanan (+ tekan, − isap)

q_h = tekanan kecepatan $\frac{1}{2}\rho v^2$

A = luas permukaan yang diekspos

Gambar 3.3 Koefisien gaya angin tipikal (C_D) untuk gedung payon (koefisien tekanan yang sebenarnya tergantung pada dimensi eksak bangunan).

Koefisien tekanan C_D bergantung pada bentuk bangunan. C_D juga sering disebut sebagai *koefisien bentuk*. Koefisien tekanan untuk berbagai bentuk secara umum merefleksikan besar relatif gangguan yang disebabkan oleh bentuk terhadap aliran angin. Bentuk langsing mempunyai koefisien tekanan lebih kecil daripada bentuk tidak langsing. Apabila aliran udara benar-benar dihentikan oleh bentuk ini, koefisien tekanannya sama dengan satu ($C_D = 1$). Pada bentuk gedung aktual, aliran udara tidak pernah benar-benar berhenti, tetapi berubah bentuk. Pola aliran di sekitar gedung aktual sangat rumit dan konfigurasinya telah banyak dipelajari serta ditabelkan. Karena untuk suatu gedung, angin menyebabkan baik tekanan maupun isapan (bergantung pada lokasi titik yang ditinjau), maka ada koefisien khusus tekanan yang ditabelkan untuk berbagai lokasi pada bangunan. Koefisien khas yang dimaksud diperlihatkan pada gambar 3.3.

Koefisien-koefisien ini hanya merupakan contoh. Banyak literatur yang membahas informasi lengkap untuk berbagai situasi dan konfigurasi bangunan.[1] Beban angin rencana resultan khas mempunyai orde 20 sampai 40 lb/ft^2 (960 sampai 1920 N/m^2).

1. Lihat "Wind Forces on Structures", Makalah 3269, Laporan Akhir Komite Khusus Mengenai Gaya Angin pada Komite Beban dan Tegangan Rivisi Struktur, ASCF; dan *Timber Construction Manual* AITC, hal. 3-23 sampai 3-29.

Efek Dinamis Angin. Pada pembahasan sebelum ini, perilaku statis beban angin telah dibicarakan. Perilaku dinamis beban angin, bagaimana pun, merupakan hal yang sangat penting. Efek dinamis dapat muncul dengan berbagai cara. Salah satunya adalah bahwa angin sangat jarang mempunyai fenomena *steady-state*. Dengan demikian, gedung dapat mengalami beban yang berbalik arah. Hal ini khususnya terjadi apabila gedung berada di daerah perkotaan. Seperti diperlihatkan pada Gambar 3.2(c), pola aliran udara di sekitar gedung tidak halus. Apabila ada gedung-gedung yang terletak berdekatan, pola angin menjadi semakin kompleks karena dapat terjadi suatu aliran yang turbulen di antara gedung-gedung itu. Aksi angin tersebut dapat menyebabkan terjadinya goyang-goyang pada berbagai arah.

Angin dapat menyebabkan respons dinamis pada bangunan sekalipun angin itu pada keadaan yang relatif mempunyai kecepatan *steady-state*. Hal ini khusus berlaku apabila struktur tersebut relatif fleksibel seperti pada banyak struktur atap yang ditumpu kabel. Angin dapat menyebabkan berbagai distribusi gaya pada permukaan atap, yang pada gilirannya dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk, baik perubahan kecil maupun perubahan besar. Bentuk baru tersebut dapat menyebabkan distribusi tekanan maupun isapan yang berbeda, yang juga dapat menyebabkan perubahan bentuk. Sebagai akibatnya, terjadi gerakan konstan atau *flutter* (getaran) pada atap. Masalah *flutter* pada atap merupakan hal penting dalam desain struktur fleksibel tersebut. Teknik mengontrol *flutter* atap mempunyai implikasi besar pada desain. Fenomena *flutter* atap pada struktur fleksibel dibahas secara lebih rinci dalam kaitannya dengan desain struktur kabel pada Bab 5.2.

Efek dinamis angin juga merupakan masalah pada struktur gedung bertingkat banyak (lihat Bab 14.3.3).

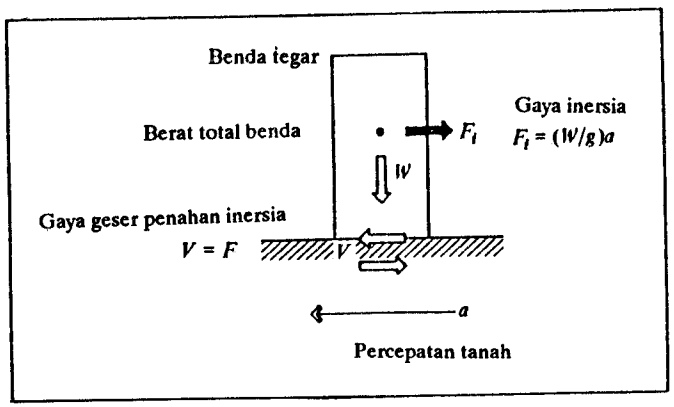
3.2.4 Gaya-gaya Gempa

Gempa bumi adalah fenomena getaran yang dikaitkan dengan *kejutan* pada kerak bumi. Beban kejut ini dapat disebabkan oleh banyak hal, tetapi salah satu yang utama adalah benturan pergesekan kerak bumi yang mempengaruhi permukaan bumi. Lokasi gesekan ini terjadi disebut *fault zones*. Kejutan yang berkaitan dengan benturan tersebut menjalar dalam bentuk gelombang. Gelombang ini menyebabkan permukaan bumi dan bangunan di atasnya bergetar. Pada saat bangunan bergetar, timbul gaya-gaya pada struktur bangunan karena adanya kecenderungan massa bangunan untuk mempertahankan dirinya dari gerakan. Gaya yang timbul ini disebut inersia. Besar gaya-gaya tersebut bergantung pada banyak faktor. Massa bangunan merupakan faktor yang paling utama karena gaya tersebut melibatkan inersia. Faktor lain adalah bagaimana massa tersebut terdistribusi, kekakuan struktur, kekakuan tanah, jenis fondasi, adanya meknisme redaman pada bangunan, dan tentu saja perilaku dan besar getaran itu sendiri. Yang terakhir ini sulit ditentukan secara tepat karena sifatnya yang acak (random) sekalipun kadang kala dapat juga tertentu. Gerakan yang diakibatkan tersebut berperilaku tiga dimensi. Gerakan tanah horizontal biasanya merupakan bentuk terpenting dalam tinjauan desain struktural.

Massa dan kekakuan struktur, juga periode alami getaran yang berkaitan, merupakan faktor terpenting yang mempengaruhi respons keseluruhan struktur terhadap getakan dan besar serta perilaku gaya-gaya yang timbul sebagai akibat gerakan tersebut. Salah satu cara untuk memahami fenomena-fenomena yang terlibat dapat kita tinjau dulu bagaimana suatu struktur kaku memberikan respons terhadap gerak getaran sederhana. Struktur mempunyai fleksibilitas seperti umumnya struktur gedung yang akan ditinjau berikutnya.

Apabila dasar suatu struktur kaku, seperti misalnya blok padat, dibebani getaran, ia akan bergerak sebagai satu kesatuan dengan gerak yang memaksanya. Karena adanya kecenderungan alami bahwa setiap massa diam mempunyai kecenderungan tetap diam, maka ada gaya inersia pada benda kaku sebagai akibat gerakan tersebut (Gambar 3.4). Bagian atas massa benda mempunyai kecenderungan untuk tetap diam, sedangkan bagian dasarnya cenderung bertranslasi sesuai dengan gerakan tanah. Perbedaan kecenderungan ini menyebabkan timbulnya gaya inersia. Untuk blok kaku sederhana yang beratnya W yang dibebani oleh gerak tanah horizontal dengan karakteristik percepatan a, gaya inersia yang timbul adalah $F_i = (W/g)a$ di mana g adalah percepatan gravitasi. Ekspresi ini dituliskan langsung dari hukum Newton kesatu yang telah kita bahas. Agar keseimbangan tercapai, harus ada gaya geser V pada dasar struktur sedemikian hingga $V = F_i = (a/g)W$. Ini juga merupakan gaya yang harus dapat ditahan oleh struktur. Ringkasnya, apabila percepatan tanah diketahui, atau dapat ditentukan, maka gaya geser pada dasar yang harus dipikul oleh struktur yang kaku sempurna dapat diperoleh sebagai persentase dari berat bangunan (katakanlah 5 sampai 20%). Elemen struktural harus dirancang untuk dapat memikul gaya geser total tersebut.

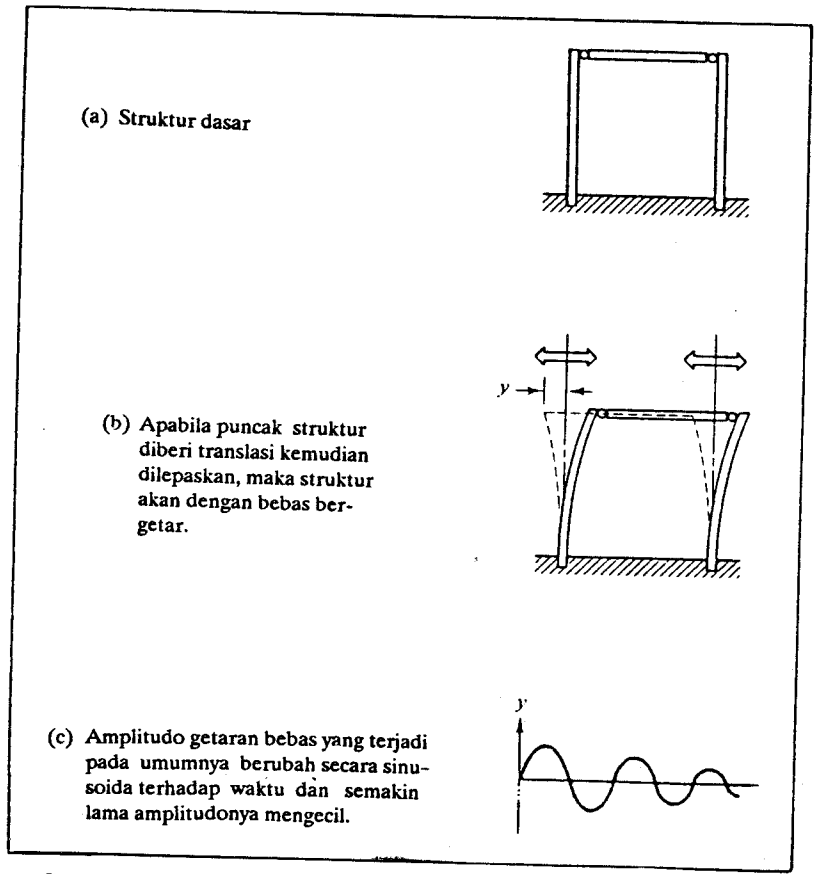
Analisis di atas menunjukkan bahwa gaya-gaya yang timbul pada benda sangat peka terhadap suatu benda secara perlahan-lahan dipindahkan hingga percepatannya mendekati nol, atau apabila benda tersebut bergerak dengan kecepatan konstan (yang berarti juga percepatannya nol), maka gaya inersia tidak timbul sama sekali. Contoh nyata adalah bumi yang berputar di dalam ruang dengan kecepatan konstan sehingga gaya inersia tidak ada. Dengan demikian, salah satu dari aspek-aspek gerakan gempa bumi yang terpenting adalah besar percepatannya.



GAMBAR 3.4 Gaya inersia akibat gerakan tanah pada benda kaku.

Meskipun konsep di atas pada awalnya telah membentuk dasar-dasar untuk desain terhadap gempa bumi, model di atas hanya merupakan penyederhanaan. Apabila fleksibilitas aktual yang dimiliki struktur diperhitungkan, maka diperlukan model yang lebih rumit untuk memprediksi gaya-gaya eksak yang timbul di dalam struktur sebagai akibat percepatan tanah. Salah satu alasan terpenting mengapa harus menggunakan model yang lebih rumit, ialah bahwa gaya-gaya yang timbul di dalam struktur fleksibel bergantung tidak hanya pada besar percepatan tanah, tetapi juga pada kelakuan relatif dan karakteristik gerak-getaran struktur itu sendiri. Suatu interaksi dapat terjadi, yang dapat mengakibatkan gaya lebih besar daripada yang dimodelkan dengan model statis.

Satu aspek penting yang utama dalam meninjau perilaku struktur fleksibel yang mengalami percepatan tanah adalah *periode alami* getaran. Perhatikanlah struktur sederhana yang diilustrasikan pada Gambar 3.5. Apabila puncak struktur dipindahkan secara horizontal, kemudian dilepaskan, jelaslah bahwa bagian atas struktur itu akan berosilasi bolak-balik dengan amplitudo yang semakin kecil sampai pada akhirnya struktur kembali diam. Yang menarik dari hal ini adalah gerak getaran ini tidak



GAMBAR 3.6 Getaran bebas dan paksa pada sistem massa-pegas

acak sama sekali, tetapi teratur. Getaran ini disebut harmonis karena peralihan berubah secara sinusoidal terhadap waktu. Waktu yang diperlukan gerakan untuk melakukan satu siklus bolak-balik lengkap disebut periode alami getaran T. Frekuensi f getaran ini didefinisikan sebagai banyak siklus yang terjadi pada satu satuan waktu. Perhatikan bahwa $f = 1/T$.

Frekuensi getaran bebas yang terjadi pada struktur yang disebut di atas bergantung langsung pada massa struktur dan pada kekuatan relatif kolom terhadap gaya horizontal. Apabila kolom pada struktur tersebut mempunyai kekuatan kecil, maka gaya pemulih (yang diperlukan untuk mengembalikan struktur dari keadaan terdefleksi ke posisi semula) relatif kecil. Dengan demikian, puncak struktur akan bergerak bolak-balik secara relatif lebih lambat sampai osilasi benar-benar habis. Struktur demikian disebut mempunyai periode alami getaran relatif panjang. Sebaliknya, apabila kolom sangat kaku, akan dapat memberikan gaya pemulih relatif lebih besar. Dengan demikian, struktur akan masih berosilasi bolak-balik, tetapi dalam waktu yang relatif singkat. Struktur demikian disebut mempunyai periode alami getaran yang relatif pendek.

Fakta bahwa osilasi struktur dapat mempunyai periode alami panjang atau pendek disebabkan oleh adanya mekanisme redaman di dalam struktur. Meknisme redaman yang menyerap energi ada di dalam semua struktur gedung. Sebagai contoh, di dalam struktur seperti terlihat pada Gambar 3.5, gaya gesek untuk mempertahankan hubungan sendi yang ada di antara balok dan kolom akan menyebabkan terjadinya redaman. Dalam struktur besar, mekanisme redaman lainnya dapat terjadi, miesalnya dengan adanya retak partisi.

Situasi yang dibahas di atas adalah terjadinya getaran bebas sebagai akibat adanya peralihan yang kemudian dilepas pada puncak struktur. Apabila dasar struktur tiba-tiba bertranslasi sedikit secara horizontal, massa struktur (khususnya balok) mula-mula akan cenderung menahan translasi tersebut karena adanya aksi inersia. Dengan demikian, struktur akan bergetar (timbul situasi yang berlawanan dengan keadaan awal). Apabila dasar struktur ditranslasikan bolak-balik terus-menerus, seperti yang terjadi pada saat gempa bumi, tentu saja struktur tersebut akan terus bergetar aktual yang terjadi secara potensial dapat sangat dipengaruhi oleh karakteristik gerak tanah yang bukan bergetar bebas. Apabila frekuensi gerakan tanah sangat berbeda dengan frekuensi alami getaran bebas struktur, tidak terjadi interaksi nyata. Sebaliknya, apabila frekuensi gerakan tanah cukup dekat dengan frekuensi getaran bebas struktur, dapat terjadi efek interaksi yang dapat mengakibatkan besarnya amplitudo getaran struktur yang lebih besar daripada yang diakibatkan oleh gerakan tanah saja.

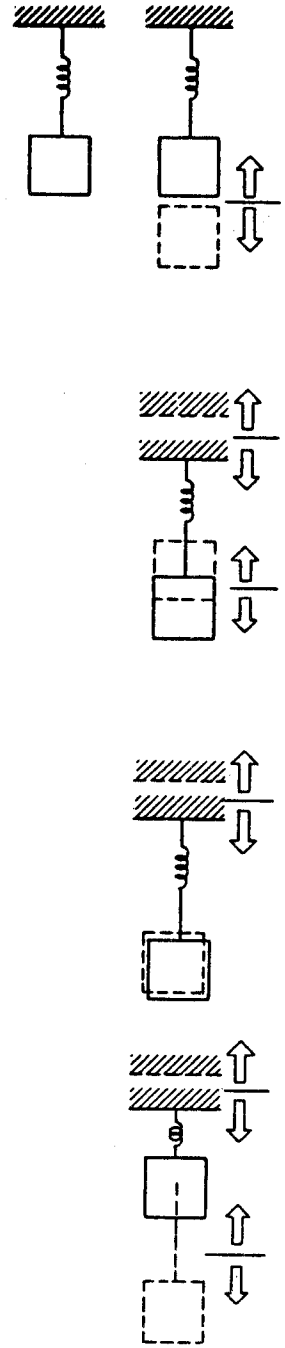
Fenomena yang dibahas di atas disebut *resonansi*, yang merupakan masalah di dalam desain struktur. Salah satu cara untuk meninjau fenomena ini adalah dengan memandang bagaimana suatu massa digantung dan diberi gangguan pada tumpuannya, seperti terlihat pada Gambar 3.6. Ada analogi mengenai hal ini, seperti akan dibahas berikutnya, antara sistem pegas dan sistem rangka. Apabila benda tergantung tersebut diberi peralihan dan dilepaskan, maka terjadi getaran bebas yang serupa dengan yang telah dibahas di atas pada struktur rangka. Periode alami getaran ini diberikan oleh rumus terkenal $T = 2\pi \sqrt{(W/gk)}$ di mana W adalah berat benda, g

(a) Getaran bebas: apabila mula-mula diberi peralihan kemudian dilepaskan, maka massa akan bergetar bebas pada frekuensi alami tertentu.

(b) Getaran dipaksakan: apabila sistem diberi gerakan osilasi dengan frekuensi jauh lebih kecil daripada frekuensi alami sistem, akan bertranslasi ke atas dan ke bawah mengikuti gerakan tumpuan (tanpa ada perpanjangan maupun perpendekan pegas).

(c) Getaran dipaksakan: apabila frekuensi osilasi yang diberikan jauh lebih besar daripada frekuensi alami sistem, aksi inersia mempunyai kecenderungan mempertahankan keadaan semula sehingga massa dapat dikatakan tetap diam. Terjadi deformasi pegas yang cukup besar dibandingkan dengan amplitudo osilasi yang diberikan.

(d) Getaran dipaksakan: apabila frekuensi osilasi yang diberikan sama dengan frekuensi alami sistem, timbul kondisi resonansi di mana amplitudo getaran massa akan melampaui amplitudo osilasi yang diberikan. Dengan demikian akan ada gaya yang sangat besar pada pegas.



Gambar 3.6 Getaran bebas dan paksa pada sistem massa-pegas

adalah percepatan gravitasi, dan k adalah konstanta pegas yang merupakan karakteristik deformasi pegas (persamaan ini dapat dilihat pada banyak literatur mengenai fisika). Sebaliknya, apabila benda tersebut hanya digantung, kemudian ujung atas pegas (tumpuannya) digerakkan ke atas dan ke bawah, akan terjadi salah satu fenomena berikut ini. Apabila gerakan osilasi yang diberikan sangat lambat (yaitu periode alaminya panjang), benda tersebut akan bertranslasi mengikuti pegas dengan laju sama. Pegas tidak akan memanjang, tetapi akan ikut bersama gerakan tumpuannya. Sebaliknya, apabila gerakan osilasi yang diberikan sangat cepat, maka benda tersebut akan relatif diam di dalam ruang karena adanya gaya inersia sebagai akibat adanya gerakan cepat tumpuan tadi. Dengan demikian, terjadi perpanjangan dan perpendekan pegas (yang berarti adanya gaya inersia), tetapi tidak harus besar dan tidak harus melebihi amplitudo osilasi yang diberikan.

Kasus kritis terjadi apabila periode osilasi yang diberikan sama besar dengan perioda alami sistem benda pegas. Dalam hal ini osilasi yang diberikan akan menyebabkan benda mulai bergetar ke atas dan ke bawah. Apabila osilasi ini terus terjadi, amplitudo gerak getaran sistem pegas massa tersebut akan terus-menerus bertambah. Dengan demikian, perpanjangan dan perpendekan relatif pegas juga terus bertambah, begitu pula dengan gaya yang timbul pada pegas. Amplitudo getaran ini dapat sangat jauh lebih besar daripada osilasi semula yang diberikan. Sebagai akibatnya, sistem tersebut akan menjadi sangat besar (dan begitu pula dengan gaya internal pada pegas) sehingga menjadi tidak mungkin dapat pulih kembali. Semua fenomena yang disebutkan di atas dapat ditunjukkan dengan menggantungkan sebuah benda pada seutas tali karet dan menggetarkannya pada berbagai kelajuan.

Struktur nyata dapat mempunyai perilaku seperti sistem yang telah dibahas di atas. Apabila frekuensi alami gerakan yang diberikan sama dengan frekuensi alami getaran sistem struktur itu sendiri, maka fenomena resonansi terjadi. Efek tersebut dapat sangat besar seperti yang terjadi pada kehancuran Tacoma Narrows Bridge di Washington pada tahun 1940. Angin menyebabkan terjadinya gerakan berputar awal pada struktur, yang kemudian mulai berosilasi dalam gerakan putaran dengan amplitudo membesar (dek jembatan tersebut sampai berada pada posisi 45° dari horizontal) sampai 2800 ft (840 meter) hingga strukturnya roboh. Hal yang menguntungkan adalah, kebanyakan gedung mempunyai mekanisme redaman cukup sehingga resonansi dinamis seperti ini jarang terjadi pada gedung. Akan tetapi, fenomena ini tetap menyebabkan terjadinya deformasi yang besarnya tak wajar, juga gaya internal pada elemen struktur. Karena itulah aksi dinamis akibat gempa perlu sangat diperhatikan karena berpotensi menyebabkan terjadinya keruntuhan yang tak diinginkan.

Analisis dinamis suatu struktur lebih rumit daripada sistem sederhana yang telah dibahas di atas karena banyaknya ragam getaran yang mungkin terjadi pada struktur. Sebagaimana akan dibahas berikut, suatu gedung bertingkat banyak dapat bergetar dengan berbagai ragam yang dapat menyebabkan lantai pada berbagai taraf mempunyai percepatan dalam arah-arah yang berbeda (lihat Bab 14.3.4). Bagaimana suatu struktur bertingkat banyak bergetar sangat rumit diprediksi. Sekalipun demikian, prediksi analitis mungkin saja dibuat dengan memodelkan struktur sebagai sistem kompleks yang terdiri atas massa-massa terpusat (yang menunjukkan berat gedung), pegas (menunjukkan kekakuan elemen-elemen struktur), dan sistem peredam (menunjukkan mekanisme penyerapan energi yang ada pada gedung, seperti yang timbul apabila terjadi retak partisi sebagai akibat gerak getaran).

Karena rumitnya analisis dinamis, model statis untuk merepresentasikan gaya gempa sangat berguna. Untuk tujuan desain ada berbagai model statis yang sering digunakan. Sebagai contoh, ekspresi yang umum digunakan pada peraturan bangunan untuk menentukan gaya desain gempa, misalnya, adalah yang berbentuk $V = ZIKCSW$. Dalam persamaan ini V adalah geser statis total pada dasar struktur, W adalah beban mati total pada gedung, C adalah koefisien yang bergantung pada periode dasar gedung (T), Z adalah faktor yang bergantung pada lokasi geografis gedung dan kemungkinan aktivitas dan intensitas gempa di lokasi yang bersangkutan, K adalah faktor yang bergantung pada jenis struktur dan konstruksi yang digunakan (terutama berkaitan dengan daktilitas dan kekakuan relatif), I adalah faktor keutamaan yang bergantung pada jenis penggunaan gedung, S adalah koefisien yang bergantung pada (antara lain) hubungan antara periode alami gedung dan periode alami tanah tempat gedung tersebut didirikan. Periode dasar getaran (T) yang menentukan faktor C biasanya diestimasi dengan menggunakan ekspresi berbentuk $T = 0{,}05H/\sqrt{D}$ di mana D adalah dimensi struktur dalam arah sejajar dengan gaya yang bekerja dan H adalah tinggi bagian utama gedung di atas dasar (dalam ft). Koefisien C mempunyai bentuk $C = 15/\sqrt{T} \leqslant 0{,}12$. Semua ekspresi dan faktor di sini ditentukan secara empiris. Gaya geser V yang diperoleh dengan menggunakan evaluasi faktor-faktor tersebut didistribusikan pada berbagai tingkat gedung dengan menggunakan metode-metode yang ada sehingga menjadi beban lateral di tiap tingkat.

Implikasi persamaan statis $V = ZIKCSW$ adalah bahwa untuk suatu gedung, gaya geser desain V lebih besar apabila sistem *bracing* "kaku" digunakan dibandingkan dengan apabila yang "fleksibel" yang digunakan. Hal ini sangat penting diketahui untuk tinjauan desain (lihat Bab 14.3.4).

Pendekatan empiris yang diringkas di atas dibahas secara lebih rinci dalam *Uniform Building Code*.[1] Akhir-akhir ini telah banyak pendekatan lain yang dikembangkan oleh Applied Technology Council yang menggunakan formulasi berbeda.

3.2.5 Kombinasi Pembebanan

Sebagaimana telah dijelaskan sebelum ini, ada berbagai jenis beban yang bekerja pada setiap struktur. Hal penting dalam menentukan beban desain adalah pertanyaan apakah semua beban tersebut bekerja secara simultan atau tidak. Sekali lagi ditekankan bahwa beban mati selalu ada pada struktur. Yang berubah-ubah harganya adalah besar beban hidup dan kombinasi beban hidup. Sebagai contoh, apakah wajar merancang struktur untuk menahan beban maksimum yang mungkin berasal dari gempa bumi dan yang diakibatkan oleh gaya angin maksimum, dan sekaligus beban penggunaan dalam keadaan penuh bekerja? Sangat kecil kemungkinan beban-beban maksimum ini terjadi pada saat yang sama.

---

1. International conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, Whitier, California, 1976.

Struktur *dapat* dirancang untuk memikul semua beban maksimum yang bekerja secara simultan, tetapi struktur demikian, bagaimana pun, akan berkekuatan sangat berlebihan untuk kombinasi beban yang secara aktual mungkin terjadi selama umur struktur. Berkenaan dengan hal ini, banyak peraturan atau rekomendasi mengenai reduksi beban desain apabila ada kombinasi beban tertentu.

Untuk beban penggunaan pada gedung bertingkat banyak sangat tidak mungkin semua lantai secara simultan memikul beban penggunaan maksimum. Oleh sebab itu, ada reduksi yang diizinkan dalam beban desain untuk merencanakan elemen struktur dengan memperhatikan efek kombinasi dan beban hidup dari banyak lantai. Rekomendasi umum yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Tidak boleh memberikan reduksi untuk beban hidup atap.
2. Untuk beban hidup 100 lb/ft^2 atau kurang, beban hidup desain pada sembarang elemen struktur yang memikul 150 ft^2 atau lebih dapat direduksi dengan kelajuan 0,08%/ft^2 luas yang dipikul elemen struktur tersebut. Hal ini tidak berlaku (jadi tidak ada reduksi) untuk garasi atau untuk daerah yang digunakan untuk umum. Reduksi tersebut tidak boleh melampaui R, yang ditentukan berikut ini, maupun 60%:

$$R = 23\left(1 + \frac{D}{L}\right)$$

di mana R = reduksi, %
D = beban mati per ft^2 luas yang ditumpu oleh elemen struktur tersebut
L = beban hidup desain per ft^2 luas yang dipikul oleh elemen struktur

Untuk beban hidup gudang yang melebihi 100 lb/ft^2, reduksi tidak boleh dilakukan kecuali bahwa beban hidup desain pada kolom bisa dikurangi 20%.

Untuk kombinasi berbagai jenis pembebanan sering kali (tetapi tidak selalu) diizinkan untuk mereduksi gaya desain total dengan faktor tertentu. Sebagai contoh, bukan 1,0 (beban mati + beban hidup + beban gempa atau angin) yang digunakan melainkan 0,75 (beban mati + beban hidup + beban gempa atau angin) sebagaimana yang disyaratkan oleh banyak peraturan. Yang dimaksud dengan ekspresi ini ialah bahwa tidak semua beban akan bekerja pada struktur pada harga maksimumnya secara simultan. Sebaliknya, struktur sudah biasa direncanakan untuk memikul beban mati dan hidup penuh yang bekerja secara simultan, atau 1,00 (beban mati + beban hidup). Biasanya banyak kombinasi pembebanan yang harus ditinjau, dan struktur direncanakan untuk memikul kombinasi pembebanan terjelek yang mungkin.

3.2.1 Langkah Dasar

Di sini dibahas langkah dasar untuk menganalisis struktur yang diberikan dengan maksud menentukan cukup atau tidaknya untuk situasi yang diberikan. Proses umum analisis secara khas melibatkan langkah-langkah yang disebutkan berikut ini.

1. Perilaku struktur yang dianalisis harus terlebih dahulu ditentukan. Sebagai contoh, dalam banyak hal mungkin dan diinginkan untuk mengisolasi elemen-elemen yang tersambung dari keseluruhan struktur gedung, dan memandangnya secara lebih rinci (misalnya memusatkan perhatian pada sebuah balok yang sebenarnya balok tersebut tersambung dengan kolom dan balok lainnya). Hal ini dapat mempercepat proses untuk menentukan apakah elemen struktur tersebut cukup untuk memegang fungsi pada keseluruhan struktur. Apabila suatu struktur dipecah menjadi elemen-elemen yang lebih mendasar, perlu ada *model* kondisi batas elemen tersebut sedemikian rupa sehingga keadaan sesungguhnya yang tergabung dapat direpresentasikan. Pemodelan ini sering kali menggunakan anggapan mengenai gaya dan momen pada untung elemen struktur tersebut. Dalam banyak hal pemodelan ini cukup sederhana (misalnya untuk sistem balok di atas tumpuan sederhana). Pemodelan demikian akan dibahas secara ringkas berikut ini. Dalam hal ini, pemodelan dapat cukup sulit (misalnya suatu balok pada struktur rangka yang mempunyai titik hubung kaku) dan mengharuskan kita meninjau secara lebih luas, yaitu melibatkan bagian lain struktur tersebut. Hal ini sering kali menyebabkan proses analisis menjadi rumit sebagaimana akan terlihat berikut ini.

Sementara dalam banyak hal seberapa besar struktur harus ditinjau sudah jelas, dalam hal lain sulit untuk menentukan bagian mana yang harus ditinjau. Situasi ini biasanya muncul apabila keseluruhan struktur dalam gedung dipandang sebagai satu kesatuan untuk menentukan beban yang disalurkan ke tanah. Sering tidak jelas, misalnya, apakah elemen gedung tertentu memikul fungsi struktural bersamaan dengan fungsi-fungsi lainnya. sebagai contoh, dinding penutup eksterior dapat berlaku sebagai alat kontrol cuaca, tetapi juga sebagai mekanisme untuk menjamin kestabilan struktur secara keseluruhan. Benar atau tidaknya bergantung pada hubungan antarelemen struktur, khususnya yang memikul beban-beban vertikal yang ditunjukkan dengan bagaimana elemen-elemen tersebut dihubungkan. Pendetailan hubungan ini bergantung pada apakah dinding eksterior tersebut akan berfungsi sebagai elemen struktural atau tidak. Alternatif lain, adanya mekanisme lain untuk stabilitas lateral (yaitu *bracing* melintang) dapat merupakan indikator apakah elemen tersebut berfungsi struktural atau tidak. Sebaliknya, akan ada kebergantungan mekanisme yang terlibat. Untuk keadaan demikian setiap elemen harus ditinjau ulang terhadap kontribusi potensialnya sebagai kesatuan struktur. Hal ini sering kali tidak dapat dilakukan tanpa secara simultan meninjau beban-beban pada struktur secara keseluruhan.

Tinjauan akhir mengenai penentuan sampai mana sistem struktural harus diperhatikan ialah bahwa dalam banyak hal perlu ada pembedaan antara bagian struktur yang *dibuat oleh manusia* dan yang *ada secara alami* yang secara fisik tergabung

menjadi suatu struktur. Sebagai contoh, struktur kabel yang di dalam kabel itu diikatkan ke dalam fondasi, sering disebut sebagai yang superior dalam sistem struktur berjenis *strut* melintang [lihat Gambar 1.17(e)] yang mampu memikul tarik horizontal karena mempunyai aksi pemikul-beban dan melibatkan lebih sedikit elemen. Kemudahan dan efisiensi seperti demikian tentu saja hanya mungkin apabila fondasi, dan juga bumi di sekitarnya, mampu memikul beban besar dan mampu berlaku sebagai fungsi struktural. Dengan demikian, apabila kita meninjau suatu sistem yang lebih besar daripada struktur yang dibuat oleh manusia, struktur kabel bentang bebas yang terikat langsung ke dalam ujung fondasi tidak menunjukkan aksi sesederhana yang ditunjukkan oleh kabel serupa dengan menggunakan *strut* melintang. Sebagaimana telah disebut sebelum ini, gaya total yang sama perlu dipikul. Struktur terakhir ini memikulnya dengan cara yang berbeda dengan yang disebut pertama, yaitu dengan memperbesar peran struktur buatan manusia dan memperkecil peran bumi di sekitarnya.

2. Langkah dasar lain dalam proses analisis yang pada umumnya dilakukan bersamaan dengan yang disebut di atas adalah menentukan perilaku sistem gaya eksternal yang bekerja pada struktur yang ditinjau. Hal ini sering kali melibatkan langkah-langkah seperti bagaimana beban penggunaan yang bekerja pada permukaan yang dipikul oleh elemen-elemen struktural disalurkan ke tanah. Hal ini memerlukan diketahuinya porsi mana dari beban total yang dipikul oleh setiap elemen struktur yang berhubungan. Dengan demikian, cukup atau tidaknya elemen struktur dapat yang dipikul oleh elemen-elemen struktural disalurkan ke tanah. Hal ini memerlukan diketahuinya porsi mana dari beban total yang dipikul oleh setiap elemen struktur yang berhubungan. Dengan demikian, cukup atau tidaknya elemen struktur dapat diketahui. Langkah-langkah ini bervariasi dari sangat sederhana sampai yang sangat sulit, yaitu pada struktur yang relatif besar.

3. Apabila sistem gaya eksternal yang bekerja pada struktur yang ditinjau telah diketahui, maka langkah berikutnya dalam proses analisis adalah menentukan dengan menerapkan prinsip-prinsip keseimbangan, momen dan gaya-gaya reaksi yang timbul pada batas-batas struktur sebagai akibat adanya gaya-gaya eksternal tersebut. Hal ini dapat merupakan proses sekali jalan apabila struktur yang ditinjau tidak rumit, tetapi dapat menjadi sangat sulit apabila strukturnya semakin rumit. Untuk *struktur statis tertentu* di mana secara tipikal hanya ada tiga reaksi yang belum diketahui, ketiga-tiganya akan dapat diperoleh secara mudah dengan menerapkan persamaan-persamaan keseimbangan statika, yaitu $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$ dan $\Sigma M_o = 0$. Suatu balok yang terletak di atas tumpuan sederhana adalah struktur statis tertentu. Pada struktur yang lebih kompleks, lebih dari tiga reaksi yang belum diketahui. Ketiga-tiganya tidak dapat diperoleh secara langsung dengan menggunakan persamaan keseimbangan saja karena (1) terdapat lebih banyak (gaya) anu daripada persamaan dan (2) gaya-gaya reaksi tersebut bergantung pada besaran fisik elemen-elemen struktur (termasuk bentuk dan material konstruksi) Dengan demikian, diperlukan metode analisis tambahan. Metode yang cocok untuk jenis struktur statis tak tentu ini akan dibahas pada bab-bab lain di dalam buku ini. Struktur sederhana yang reaksinya dapat diperoleh langsung dengan statika saja akan dibahas pada bagian lain bab ini.

4. Sesudah menetapkan perilaku sistem gaya lengkap, yaitu beban yang bekerja dan gaya-gaya reaksi pada struktur, langkah berikutnya dalam analisis umum adalah menentukan perilaku momen dan gaya internal yang timbul di dalam struktur sebagai akibat gaya-gaya eksternal. Untuk elemen-elemen kaku linear, seperti balok, secara khas hal ini melibatkan penentuan besar dan distribusi momen serta geser internal di dalam struktur. Untuk struktur-struktur lain mungkin ada bentuk gaya internal lain (misalnya gaya aksial pada batang yang merupakan bagian dari rangka batang). Dasar yang akan diterapkan di dalam buku ini ialah bahwa mekanisme pemikul beban untuk semua struktur itu sama dan cara mempelajarinya yang terbaik adalah dengan acuan konsep geser dan momen. Dengan demikian, perlu penekanan dalam menentukan besaran-besaran tersebut. Teknik-teknik khusus untuk menentukan gaya internal akan dibahas pada Bagian II yang berhubungan dengan elemen-elemen struktural khusus.

5. Dengan mengetahui gaya-gaya internal yang ada pada struktur, kita dapat menentukan apakah setiap elemen strukturnya cukup untuk memikul gaya-gaya interal tersebut tanpa mengalami kelebihan tegangan maupun deformasi. Dengan demikian hal ini berarti melibatkan perhitungan tegangan yang dikaitkan dengan keadaan gaya internal yang ada dan membandingkan taraf tegangan tersebut dengan taraf tegangan yang diketahui aman untuk dipikul oleh material yang dipakai. Pendugaan taraf tegangan aktual memerlukan peninjauan banyaknya dan distribusi material di dalam struktur. Taraf tegangan yang diizinkan itu didasarkan atas penelitian empiris untuk berbagai material (lihat Bab 2.4.2). Pendugaan deformasi aktual memerlukan peninjauan tidak hanya banyaknya dan distribusi material, tetapi juga karakteristik beban deformasi material. Kriteria deformasi yang bagaimana yang masih dapat diterima, juga ditentukan secara empiris. Teknik membuat prediksi demikian dibahas pada bagian lain buku ini.

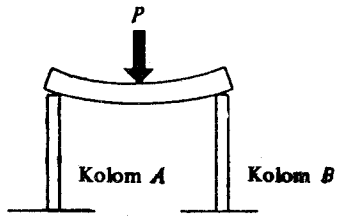
Langkah-langkah yang telah disebutkan di atas kurang-lebih menunjukkan proses umum dalam analisis sembarang jenis struktur.

3.3.2 Pemodelan Struktur

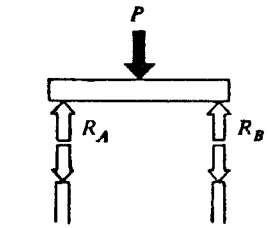
Pada bagian ini dibahas bagaimana mengisolasi sebagian dari keseluruhan struktur dan memodelkannya dengan cara yang berguna untuk tujuan analisis. Struktur dibagi ke dalam elemen-elemen yang lebih mendasar dengan cara memisahkannya secara khas pada hubungan antara elemen-elemen struktur, kemudian mengganti aksi elemen sebelahnya dengan sekumpulan gaya dan momen yang mempunyai efek ekuivalen. Hal ini biasanya mudah untuk struktur sederhana seperti terlihat pada Gambar 3.7(a). Dalam hal ini, gaya yang dimodelkan adalah gaya-gaya reaksi. Di setiap titik hubung ada sekumpulan gaya yang berlawanan arah. Sebagai contoh, pada kolom *B*, gaya R_B yang berarah ke bawah adalah ekuivalen (dan menggantikan) efek keseluruhan sistem balok horizontal yang dibebani dan bekerja pada kolom. Dalam hal ini pemodelan tidak sulit. Perhatikan bahwa ada asumsi yang telah digunakan, yaitu bahwa balok terletak sederhana di atas kolom. Titik hubung tersebut dianggap hanya menyalurkan gaya vertikal. Hal ini hanya berlaku untuk kondisi tertentu, yaitu apabila hubungan antara balok dan kolom tidak kaku. Dengan demikian kolom tidak

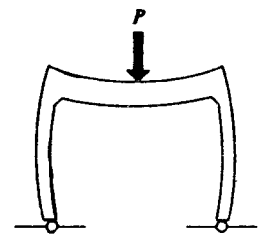
menahan rotasi ujung-ujung balok. Apabila kenyataannya tidak demikian, berar pemodelan tidak benar, dan diperlukan model yang lebih umum seperti yang terlih pada Gambar 3.7(b). Jenis struktur demikian, yaitu *rangka,* dibahas secara leb rinci dalam Bab 9. Pembahasan dalam Bab 2.4 juga berhubungan dengan konteks i

Seperti telah disebutkan di atas, pemodelan efektif bergantung pada pengide tifikasian perilaku eksak struktural pada titik hubung elemen struktur. Untuk k mudahan analitis, titik hubung dapat dimodelkan sebagai salah satu dari jenis-je dasar seperti telah dibahas pada Bab 2.4.1 (yaitu titik sendi, rol, dan jepit). Dala penentuan model mana yang paling mendekati keadaan nyata di dalam prakte diperlukan pertimbangan yang matang. Beberapa hubungan aktual dan mo ekuivalennya diilustrasikan dalam Gambar 3.8.

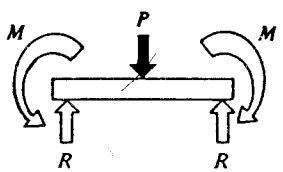


(a) Balok terletak sederhana: karena balok terletak di atas kolom secara sederhana, maka titik hubung tidak menahan rotasi, hanya gaya vertikal yang dapat disalurkan oleh titik hubung,

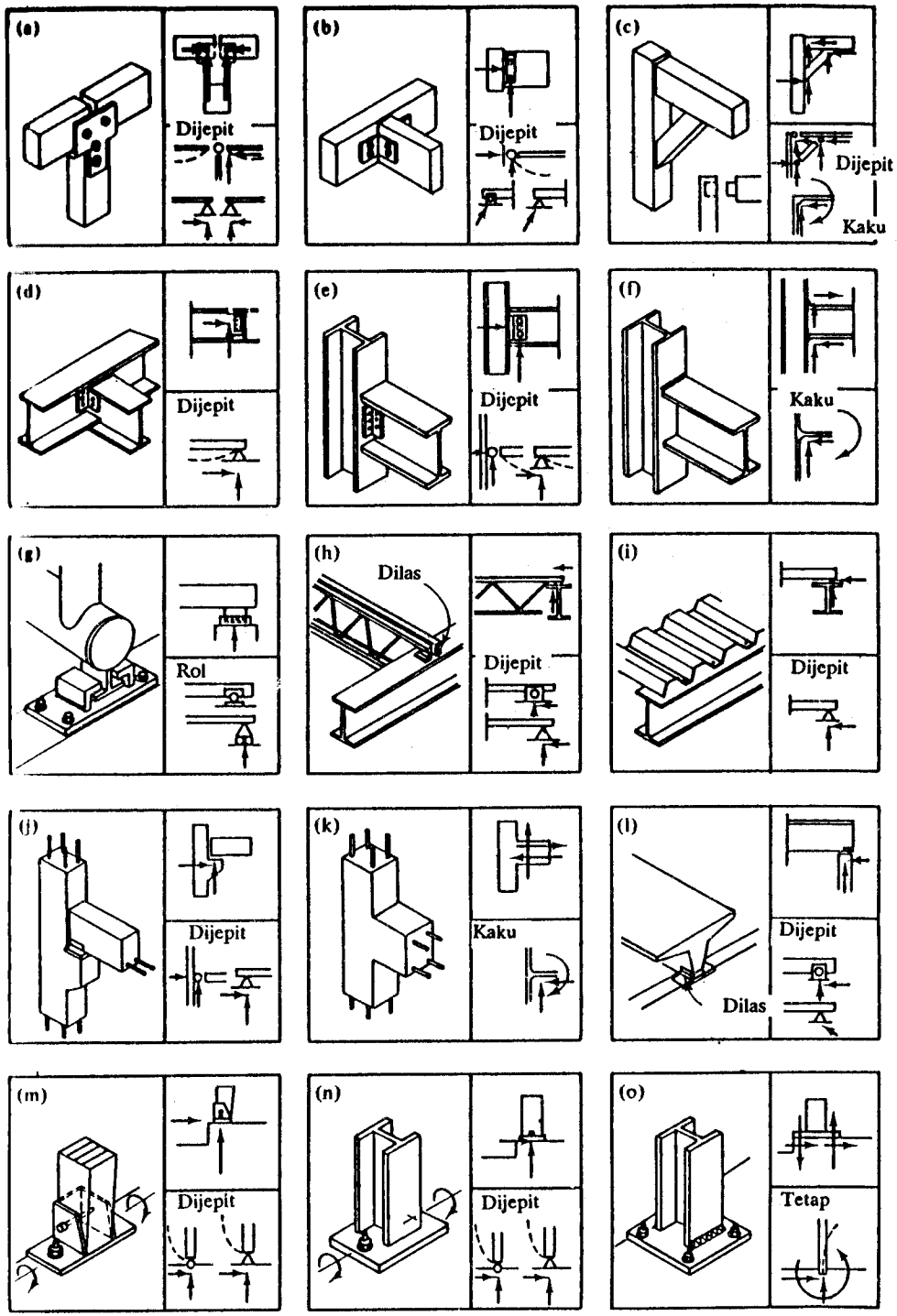




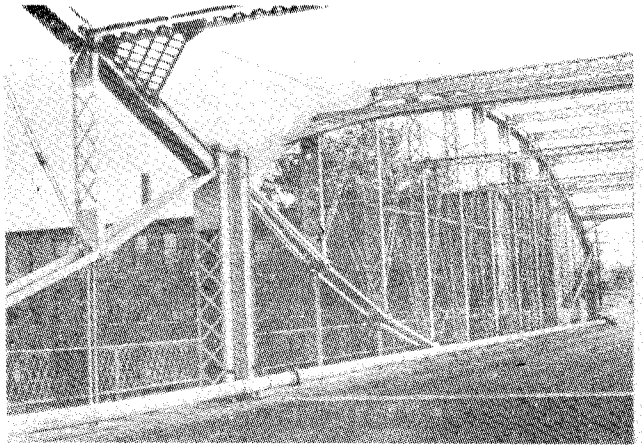
(b) Rangka: karena balok secara kaku dihubungkan dengan kolom, maka kolom dapat menahan rotasi ujung-ujung balok. Dengan demikian momen dan gaya dapat disalurkan oleh hubungan kaku seperti ini.



GAMBAR 3.7 Pengisolasian elemen struktural.



Gambar 3.8 Jenis hubungan dan model idealisasinya



(a) Jembatan "lenticular" di Lowell, Massachusetts

(b) Hubungan "sendi" khas

GAMBAR 3.9 Kebanyakan struktur di masa lampau menggunakan titik hubung yang secara fisik benar-benar "sendi" Sebutan demikian sekarang masih dipakai pada titik hubung struktur modern yang serupa dengan "sendi" tersebut.

Langkah awal untuk menganalisis suatu titik adalah menyelidiki apakah titi itu dapat meneruskan rotasi pada suatu elemen struktur akibat suatu beban k elemen lainnya. Apabila titik tersebut *tidak* meneruskan rotasi, maka biasany dimodelkan sebagai sendi atau rol. Pemilihan antara keduanya bergantung pad apakah titik tersebut dapat meneruskan hanya pada satu arah atau pada arah sem barang. Apabila gaya tersebut dapat disalurkan pada sembarang arah, maka titi tersebut dimodelkan sebagai sendi. Titik sendi membolehkan terjadinya rota relatif antara elemen struktur yang dihubungkannya, tetapi tidak translasiny Titik sendi ini juga dapat menyalurkan gaya pada sembarang arah. Apabila gaya-gay hanya dapat disalurkan pada satu arah, maka titik hubung tersebut dipandang sebag rol. Hubungan rol ini membolehkan terjadinya rotasi antara elemen struktur dan jug translasi dalam arah tegak lurus gaya yang disalurkannya. Dalam banyak hal perl diperhatikan bahwa titik hubung sendi biasanya dibuat dengan menggunakan sebua sendi yang menghubungkan kedua elemen struktur, dan titik hubung rol denga menggunakan rol aktual. Gadung dan jembatan tua dibuat dengan menggunaka cara tersebut. Dengan demikian akan sama dengan ilustrasi pada Gambar 3.9. Pad struktur gedung yang sangat besar, hubungan demikian masih dapat digunakan

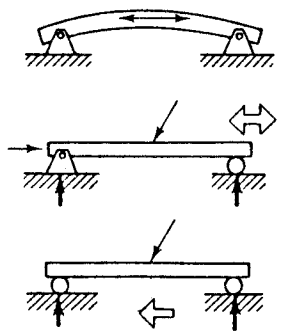
Apabila titik hubung dapat meneruskan rotasi, jadi ada momen pada masing masing ujung elemen struktur, titik hubung ini disebut *titik kumpul kaku (rigid joints).* Titik hubung kaku selalu mempertahankan sudut antara elemen-elemen struktur. Apabila titik hubung kaku seperti terlihat pada Gambar 3.8(f) merupakan bagian dari suatu rangka, bagaimana pun dapat mengalami translasi dan rotasi sebaga satu kesatuan (Bab 9). Jika suatu elemen struktur terjepit kaku pada fondasi yang tidak membolehkan adanya translasi maupun rotasi antara ujung elemen struktur dan

fondasi, maka titik hubung tersebut dikatakan hubungan *ujung jepit* [lihat Gambar 3.8(o)]. Gaya pada sembarang arah dapat disalurkan oleh titik hubung berjenis demikian.

Kadang kala perbedaan antara titik hubung sendi dan jepit sulit untuk ditentukan langsung. Biasanya, apabila satu elemen struktur dihubungkan dengan yang lainnya pada satu titik saja, maka titik hubung tersebut adalah sendi. Jika elemen struktur dihubungkan oleh sebaran titik, maka titik hubung tersebut dikatakan kaku. Tidak mungkin terjadi suatu rotasi disalurkan oleh elemen struktur ke elemen struktur lainnya melalui titik hubung yang menggunakan hanya satu titik, terutama apabila elemen struktur tersebut sedemikian besar dibandingkan dengan titik tersebut. Gambar 3.8(c) dan (f) mengilustrasikan dua elemen struktur baja flens-lebar yang dihubungkan dengan dua cara yang berbeda. Gambar 3.8(e) menunjukkan hubungan sendi karena dihubungkan, pada dasarnya, pada hanya satu titik. Di dalam Gambar 3.8(f), las yang menggabungkan *flens* dan *web* kedua elemen struktur menyebabkan titik hubung itu menjadi kaku.

Pada struktur nyata, titik hubung rol ada yang bisa dan ada yang tidak bisa menahan gerak ke atas. Sebagaimana terlihat pada Gambar 3.8(g), kita dapat melakukan agar rol dapat menahan gerak ke atas. apabila pembebanan diketahui hanya berarah ke bawah, titik hubung dapat dirancang tanpa harus mampu memikul gerak ke atas. Sekalipun demikian, di dalam buku ini dianggap bahwa tumpuan rol dirancang untuk dapat menahan gaya ke bawah maupun ke atas karena memang pada prakteknya kita dapat membuatnya demikian.

Pembahasan sebelum ini dipusatkan pada perilaku berbagai titik hubung. Perlu juga diperhatikan bahwa ada persyaratan minimum mengenai banyaknya dan jenis titik hubung struktur dengan tanah. Kumpulan titik hubung pada sistem struktur harus mampu mempertahankan persamaan keseimbangan dasar $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$ dan $\Sigma M_o = 0$. Seperti terlihat pada Gambar 3.10(c), misalnya, balok tidak dapat terletak di atas dua tumpuan rol karena, apabila padanya diberi beban horizontal, struktur akan bertranslasi dalam arah horizontal. Cara alternatif untuk melihat hal ini ialah dengan mengatakan $\Sigma F_x = 0$ tidak dapat terpenuhi oleh balok demikian.



(a) Apabila kedua ujung balok adalah sendi, perubahan temperatur dapat menyebabkan gaya internal besar pada balok karena tidak dapat dengan bebas berekspansi atau berkontraksi.

(b) Satu sendi diganti dengan rol sehingga ekspansi ataupun kontraksi dapat terjadi dengan bebas. Struktur demikian masih tetap stabil.

(c) Jika tumpuan rol digunakan pada kedua ujung, struktur akan bergerak apabila ada beban horizontal, salah satu tumpuan haruslah sendi.

GAMBAR 3.10 Penggunaan tumpuan rol.

Jadi, paling sedikit satu tumpuannya adalah sendi. Bisa juga kedua ujungnya ditumpu oleh sendi. Secara khas, satu titik hubung biasanya tidak ditahan secara horizontal agar ekspansi maupun kontraksi akibat temperatur dapat terjadi dengan baik. Penggunaan sendi pada kedua ujungnya dapat menyebabkan timbulnya gaya-gaya apabila strukturnya akan berubah panjangnya sebagai akibat perubahan temperatur. Gaya-gaya yang secara potensial terlibat dapat sedemikian besarnya sehingga mungkin menimbulkan kegagalan pada struktur. Dengan demikian, kondisi tumpuan yang umum digunakan adalah seperti terlihat pada Gambar 3.10(b).

3.3.3 Pemodelan Beban Eksternal

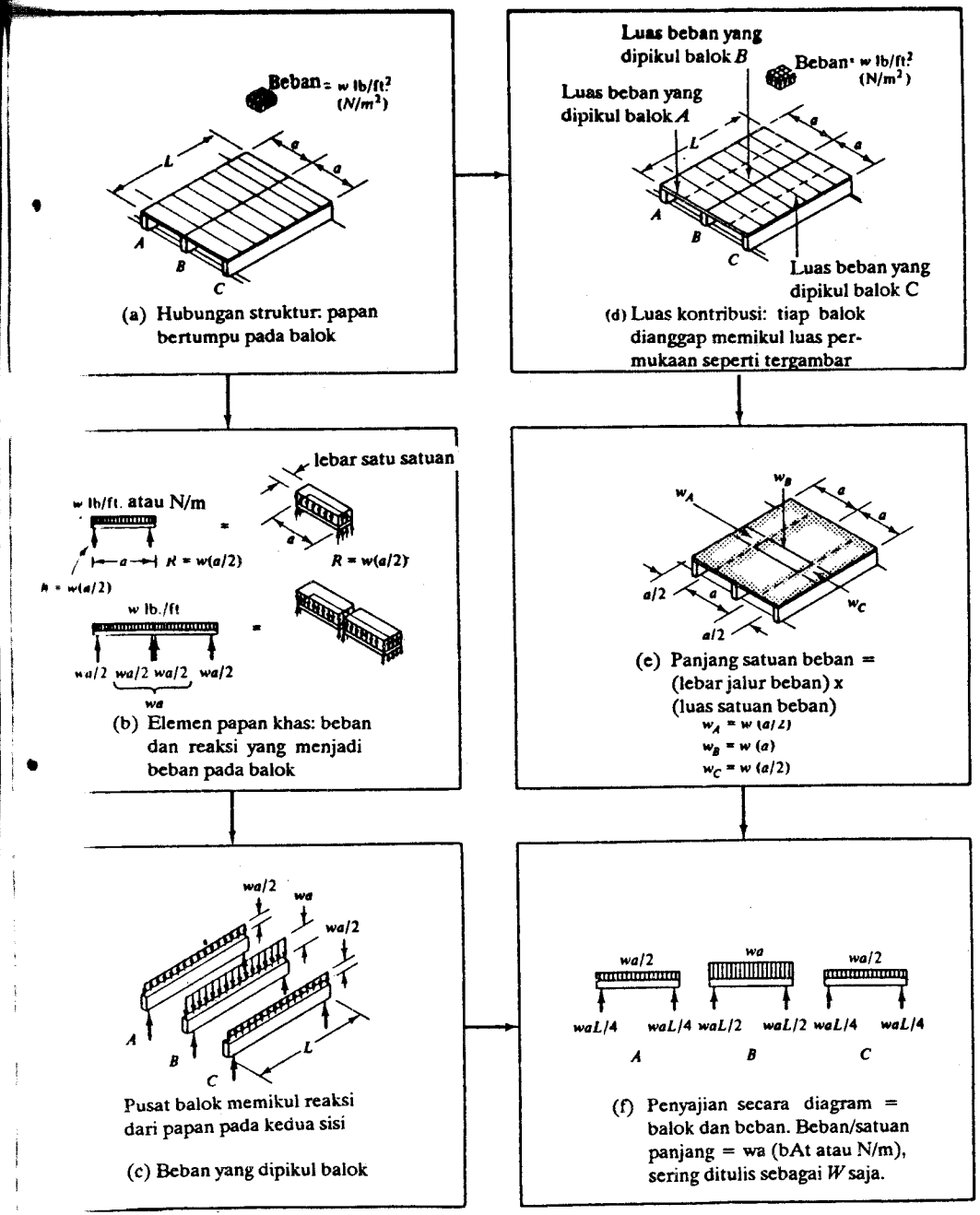
Bagian ini membahas metode-metode yang berguna dalam proses analisis mengenai sistem beban eksternal yang bekerja pada struktur yang ditinjau.

Sebagaimana telah disebutkan, beban aktual pada gedung secara khas dapat terpusat atau terdistribusi merata pada suatu luasan. Beban terpusat cukup digambarkan dengan vektor gaya, sedangkan untuk beban terbagi merata diperlukan pemodelan apabila luasan yang ditinjau pada kenyataannya terdiri atas elemen-elemen permukaan dan garis-satu-arah. Setiap elemen tersebut akan mengambil bagian dari beban total yang bekerja, bergantung pada susunannya.

Perhatikanlah susunan struktur sederhana seperti terlihat pada Gambar 3.11(a). Karena semua titik hubung dalam gambar ini adalah tumpuan sederhana, maka struktur dapat dipecah atas bagian-bagian seperti tergambar. Untuk elemen papan lebar, reaksinya lebih tepat dimodelkan sebagai *garis* seperti terlihat pada Gambar 3.11(b), bukan titik. Semua reaksi dari papan ditumpu oleh balok, kemudian menjadi beban pada balok. Perhatikan bahwa beban-beban ini membentuk beban garis menerus. Beban seperti ini dinyatakan dalam gaya per satuan panjang (misalnya lb/ft atau N/m) dan sangat sering dijumpai dalam proses analisis struktur. Beban-beban tersebut dapat dihitung dengan mula-mula menentukan reaksi papan dan kemudian memandangnya sebagai beban-beban pada balok yang menumpunya [lihat Gambar 3.11(c)].

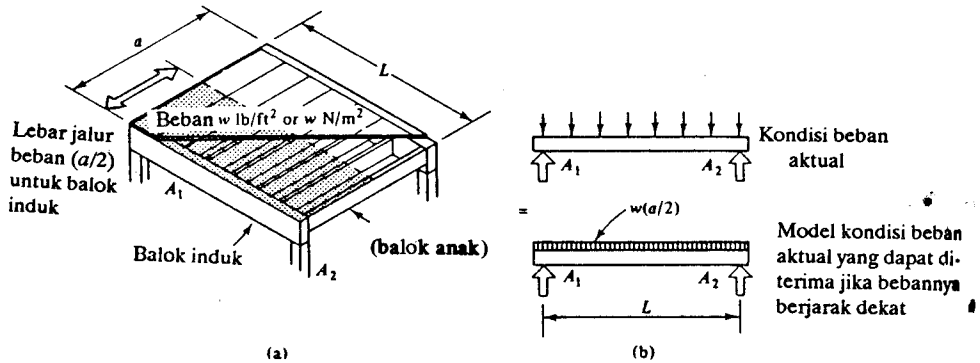
Cara lain melihat beban merata tersebut adalah dengan menyatakan suatu *luasan kontribusi*. Dengan alasan simetri, setiap balok dapat dipandang memikul luasan seperti terlihat pada Gambar 3.11(d). Lebar setiap luasan sering disebut *jalur beban*. Jika elemen struktur dibebani pada elevasi ini, beban yang bekerja pada lebar jalur beban dianggap disalurkan ke balok yang menumpunya. Jika beban terdistribusi merata ini konstan dan jalur beban ini mempunyai lebar konstan, maka besar beban yang dipikul *per satuan panjang* balok penumpu adalah beban per satuan luas dikali lebar jalur balok. Proses ini diperlihatkan dalam Gambar 3.11(e). Hasilnya juga berupa beban garis menerus yang dinyatakan dalam gaya per satuan panjang. Proses tersebut hanya sah untuk beban simetris.

Kedua metode yang disebutkan di atas menghasilkan beban yang sama pada balok yang menumpunya [lihat Gambar 3.11(f)]. Di antara keduanya, yang pertama merupakan model yang lebih tepat untuk mengetahui apa yang terjadi pada struktur dan bagaimana beban-beban disalurkan ke tanah. Sekalipun demikian, metode kedua lebih mudah digunakan dan merupakan cara ringkas dalam menentukan beban.



GAMBAR 3.11 Dua pendekatan untuk memodelkan kondisi pembebanan. Model yang diperlihatkan di sebelah kiri memperlihatkan bagaimana beban permukaan dipikul oleh sistem balok. Model di sebelah kanan, yang didasarkan pada konsep luas kontribusi, sering digunakan untuk kemudahan. Kedua pendekatan menghasilkan beban sama pada balok.

Apabila sekumpulan elemen struktur ditumpu oleh sekumpulan *joist* (balok anak) berjarak dekat yang menumpu papan dek, jelaslah bahwa masing-masing *joist* memikul beban merata per satuan panjang. Beban ini diperoleh dengan mengalikan lebar jalur beban (yaitu jarak *joist)* dengan beban per satuan luas. Metode ini secara khas digunakan, baik untuk papan yang terletak menerus di atas beberapa *joist* ataupun yang terbentang hanya dari *joist* ke *joist.* Secara teoretis, memang ada perbedaan antara kedua kasus itu, tetapi perbedaan ini tidak sampai mengharuskan kita membuat model lain. Kemudian reaksi *joist* dapat diketahui. Selanjutnya balok induk memikul reaksi dari balok-balok anak. Dengan demikian, pada dasarnya balok induk memikul beban-beban terpusat yang berjarak dekat. Akan tetapi, untuk kemudahan perhitungan, beban-beban terpusat ini sering kali diganti dengan beban terpusat ekuivalen yang diperoleh dengan memandang lebar jalur beban pada luasan kontribusi permukaan yang ditumpu oleh elemen struktur. Hal ini masih cukup baik apabila memang beban terpusat tersebut berjarak dekat. Gambar 3.12 mengilustrasikan proses ini.



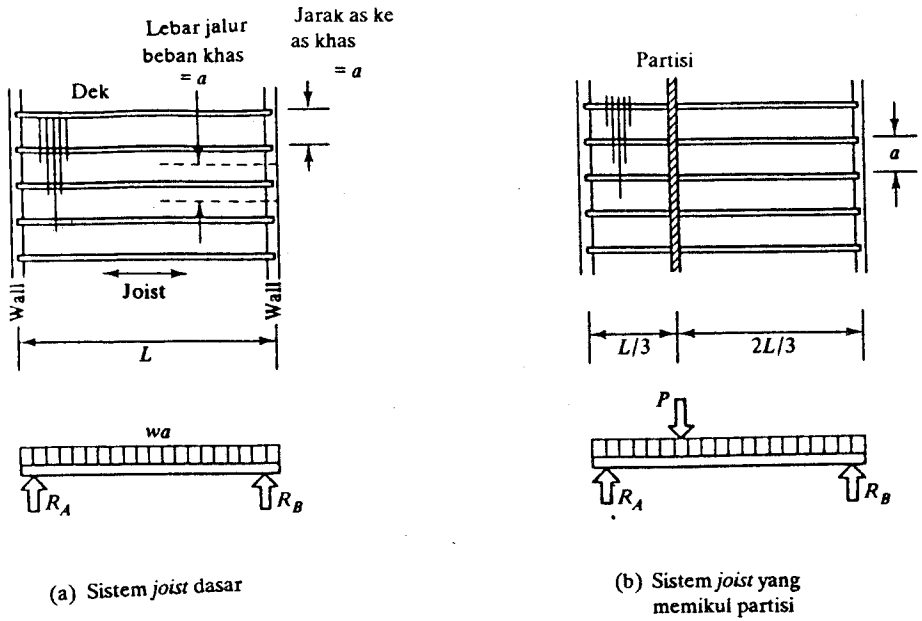
GAMBAR 3.12 Beban terdistribusi merata ekivalen yang dapat digunakan sebagai pendekatan untuk sekumpulan beban terpusat berjarak dekat.

Model yang digunakan dapat sederhana, dapat rumit, bergantung pada kebutuhan. Dalam tahap awal perencanaan, jenis pendekatan yang telah dibahas di atas masih cukup aman untuk digunakan. Tentu saja beban yang ditinjau harus memasukkan komponen beban mati dan beban hidup. Harga eksak beban mati dapat diperoleh dengan meninjau secara rinci ukuran dan berat satuan semua elemen yang terlibat. Penentuan harga-harga ini kadang kala merupakan pekerjaan yang menyita banyak waktu. Alternatif dari hal ini adalah dengan menggunakan berat ekuivalen pendekatan, yang secara khas dinyatakan sebagai gaya per satuan luas untuk menunjukkan berat seluruh elemen. Dengan demikian, pada Gambar 3.12 beban mati rata-rata sistem dek, *joist,* dan balok dapat dinyatakan dalam (x_2) lb/ft² atau (x_1) N/m² di mana harga x diestimasi atau diperoleh dari data empiris. Karena beban hidup juga dinyatakan dalam gaya per satuan luas, maka proses perhitungan ini menjadi lebih mudah. Kedua beban ditinjau secara simultan. Prosedur demikian dapat dilakukan untuk tujuan prarencana saja. Pada proses analisis lengkap perlu dilakukan cara yang lebih teliti.

Contoh berikut ini mengilustrasikan beberapa prinsip yang telah disebutkan di atas. Contoh sederhana sistem *joist* lantai diikuti dengan struktur yang lebih kompleks.

CONTOH

Tentukan reaksi untuk *joist* interior tipikal pada sistem lantai seperti terlihat pada Gambar 3.13(a). Anggap bahwa bentang dan beban seperti diperlihatkan berikut ini.



GAMBAR 3.13 Contoh sistem lantai.

Solusi:

bentang *joist* khas = L = 16,0 ft = 4,88 m
Jarak as ke as khas = a = 16 in = 0,406 m
Beban hidup = w_L = 40 lb/ft² = 1915 N/m²

Beban mati = w_D:

Penutup lantai	= 2,5 lb/ft²	= 119,7 N/m²
Penutup lantai kasar	= 2,5 lb/ft²	= 119,7 N/m²
Langit-langit	= 10,0 lb/ft²	= 478,8 N/m²
Joist (diestimasi)	= 9,0 lb/ft²	= 430,9 N/m²
Beban mati total	= 24,0 lb/ft²	= 1149,1 N/m²

Beban total = $w_D + w_L$ = (24,0 + 40,0) = 64,0 lb/ft²
= (1915 + 1149,1) = 30641 N/m²

Reaksi:

$\Sigma F_Y = 0$:

$$R_A + R_B - \underbrace{(w_D + w_L)\,(a)\,(L)}_{\text{gaya per satuan panjang}}\ \underbrace{(L/2)}_{\text{panjang joist}} = 0$$

gaya total berarah ke bawah

$\Sigma M_A = 0$:

$$0(R_A) + L(R_B) - \underbrace{(w_D + w_L)\,(a)\,(L)}_{\text{gaya total ke bawah}}\ \underbrace{(L/2)}_{\text{lengan momen}} = 0$$

$$R_B = \frac{(w_D + w_L)\,(a)\,(L)}{2}$$

Dari $\Sigma F_y = 0$:

$$R_A = (w_D + w_L)(a)(L)/2$$

sehingga:

$$R_A = R_B = \frac{(64{,}0\ \text{lb/ft}^2)(1{,}33\ \text{ft})(16{,}0\ \text{ft})}{2} = 682\ \text{lb}$$

$$= \frac{(3064{,}1\ \text{N/m}^2)(0{,}406\ \text{m})(4{,}88\ \text{m})}{2} = 3035\ \text{N}$$

Dengan demikian reaksi *joist* khas adalah 682 lb (3035 N).

CONTOH

Tentukan reaksi *joist* interior khas pada sistem lantai yang memikul dinding partisi seperti terlihat pada Gambar 3.13(b). Anggap bahwa semua beban dan bentang sama dengan yang digunakan dalam contoh sebelum ini, dan perbedaan yang ada hanyalah adanya dinding partisi.

Solusi:

Partisi:

Anggap bahwa partisi tersebut mempunyai tinggi 8,0 ft (2,44 m) dan berat 20 lb/ft^2 (958 N/m^2). Gaya terpusat pada *joist* berasal dari partisi dan dihitung sebagai berikut. *Joist* mempunyai jarak konstan sebesar 1,33 ft (0,406 m) as ke as, dan karena partisi mempunyai tinggi 8,0 ft (2,44 m), maka luas partisi yang menumpu pada *joist* adalah:

$$8{,}0 \times 1{,}33 = 10{,}67\ \text{ft}^2 (\text{atau } 0{,}406 \times 2{,}44 = 0{,}99\ \text{m}^2)$$

Gaya terpusat pada saut *joist* adalah:

$$10{,}67\ \text{ft}^2 \times 20\ \text{lb/ft}^2 = 213{,}4\ \text{lb}$$
$$(\text{atau } 0{,}99\ \text{m}^2 \times 958\ \text{N/m}^2 = 950\ \text{N})$$

Gaya ini mempunyai lokasi seperti terlihat pada Gambar 3.13(b). Semua beban lain (yaitu wD + w_L) diperoleh dari contoh sebelum ini.

Reaksi

$$\sum M_A = 0:$$

$$0(R_A) + L(R_B) - [(w_D + w_L)(a)(L)]\frac{L}{2} - \frac{L}{3}(P) = 0$$

atau

$$16{,}0(R_B) - [(64{,}0\ \text{lb/ft}^2)(1{,}33\ \text{ft})(16{,}0\ \text{ft})](8{,}0\ \text{ft}) - (16{,}0/3\ \text{ft})(213{,}4\ \text{lb}) = 0 \qquad R_B = 753\ \text{lb}$$

atau

$$4{,}88(R_B) - [(3064{,}1\ \text{N/m}^2)(0{,}406\ \text{m})(4{,}88\ \text{m})](2{,}44\ \text{m}) - (4{,}88\ \text{m}/3)(950\ \text{N}) = 0 \qquad R_B = 3352\ \text{N}$$

$$\sum F_y = 0:$$

$$R_A + R_B - (w_D + w_L)(a)(L) - P \qquad R_A = 824\ \text{lb} = 3668\ \text{N}$$

CONTOH

Tentukanlah beban pada kolom *M* dan *N* pada struktur seperti terlihat pada Gambar 3.14. Anggap bahwa beban adalah w_T lb/ft^2 atau w_T kg/m^2, dan harga ini merefleksikan beban mati dan hidup.

Solusi:

Langkah pertama adalah menentukan bagaimana beban permukaan disalurkan ke kolom. Hal ini dapat dilakukan dengan menggambar diagram benda bebas untuk setiap elemen pada struktur [lihat Gambar 3.14]. Untuk menentukan besar beban kolom, mula-mula kita hitung beban yang dipikul oleh setiap *joist*. Selanjutnya kita hitung reaksi untuk setiap *joist*, dan akhirnya kita hitung reaksi balok yang memikul *joist*. Reaksi-reaksi ini adalah beban-beban pada kolom. Proses demikian, yang dimulai dengan analisis elemen struktur terkecil, kemudian sampai dengan tinjauan elemen struktur yang mengumpulkan elemen struktur kecil tadi, adalah hal yang biasa dilakukan dalam analisis.

Reaksi joist: elemen struktur A dan D

Beban per satuan panjang yang dipukul oleh *joist* diperoleh dengan meninjau lebar jalur beban yang dipikul oleh setiap *joist*. Ujung-ujung *joist*, *A* dan *D*, memikul jalur

beban selebar $(a/2)$. Jika beban total per satuan luas adalah wT, maka beban per satuan panjang yang dipikul oleh *joist* A dan D adalah $w_T\,(a/2)$.

$$\sum M_{R_{A_1}} = 0:$$

$$\underbrace{-[w_T(a/2)(L)]}_{\text{lengan momen}}\underbrace{(L/2)}_{\text{lengan momen}} + \underbrace{1{,}0L}_{\text{lengan momen}}\underbrace{(R_{A_2})}_{\text{reaksi yang belum diketahui}} = 0 \qquad R_{A_2} = 0{,}25w_TaL$$

$$\sum F_y = 0:$$

$$\underbrace{+R_{A_1}}_{\text{reaksi belum diketahui}} + \underbrace{R_{A_2}}_{\text{telah dihitung}} - \underbrace{w_T(a/2)(L)}_{\text{beban total ke bawah}} = 0 \qquad R_{A_1} = 0{,}25w_TaL$$

Dengan cara sama

$$R_{D_1} = 0{,}25w_TaL \quad \text{and} \quad R_{D_2} = 0{,}25w_TaL$$

Reaksi joist: elemen struktur B dan C

Beban per satuan panjang yang dipikul oleh *joist* B dan C tidak konstan karena adanya bukaan. Pada bagian di mana dek menerus, lebar jalur beban adalah (a), karena itu beban per satuan panjang adalah $w_T(a)$. Pada bagian di mana ada lubang, setiap *joist* akan memikul jalur beban setengah dari bagian menerus, atau $(a/2)$. Beban per satuan panjang bagian ini adalah $w_T(a/2)$.

$$\sum M_{R_{B_1}} = 0:$$

$$\underbrace{-[w_T(a)(0{,}7L)]}_{\text{beban}}\underbrace{\left(\frac{0.7L}{2}\right)}_{\text{lengan momen}} - \underbrace{\left[w_T\left(\frac{a}{2}\right)(0{,}3L)\right]}_{\text{beban parsial}}\underbrace{\left(0{,}7L + \frac{0{,}3L}{2}\right)}_{\text{lengan momen}} + \underbrace{R_{B_2}}_{\text{reaksi}}\underbrace{(1{,}0L)}_{\text{moment arm}} = 0$$

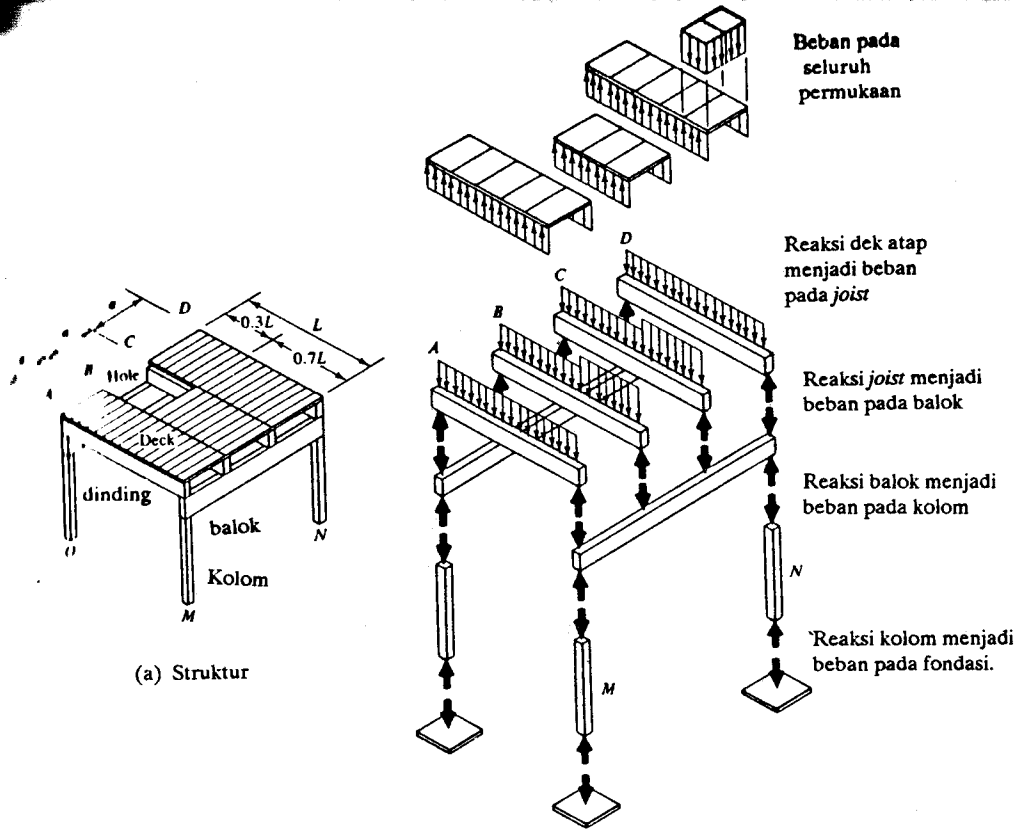
$$R_{B_2} = 0{,}3725w_TaL$$

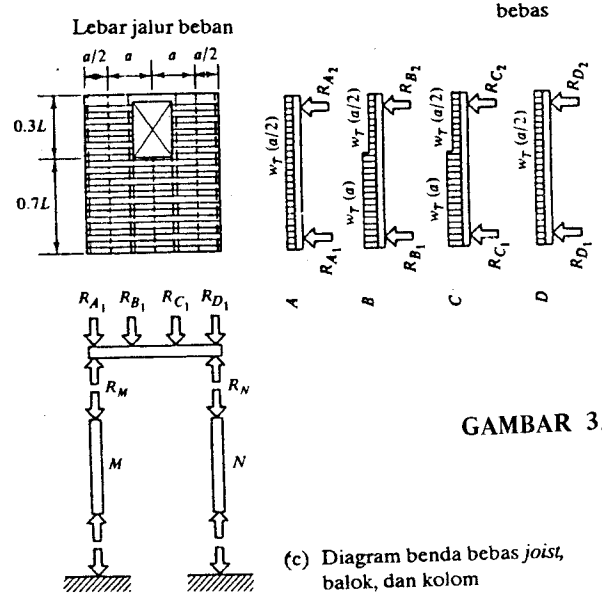
$$\sum F_y = 0:$$

$$\underbrace{R_{B_1}}_{\text{reaksi}} + \underbrace{R_{B_2}}_{\text{reaksi}} - \underbrace{[w_T(a)(0{,}7L)]}_{\text{beban}} - \underbrace{\left[w_T\left(\frac{a}{2}\right)(0{,}3L)\right]}_{\text{beban parsial}} = 0 \qquad R_{B_1} = 0{,}4775w_TaL$$

Similarly,

$$R_{C_1} = 0{,}4775w_TaL \quad \text{dan} \quad R_{C_2} = 0{,}3725w_TaL$$





GAMBAR 3.14 Struktur contoh

Gambar 3.14 Struktur contoh

Reaksi balok:

Beban-beban pada kolom M dan N adalah reaksi pada balok melintang yang memukul beban dari *joist* (reaksi R_{A_1}, R_{B_1}, R_{C_1}, dan R_{D_1}.

Pada balok, $\Sigma M_{R_M} = 0$:

$$-R_{A_1}(0) - R_{B_1}(a) - R_{C_1}(2a) - R_{D_1}(3a) + R_M(0) + R_N(3a) = 0$$

Dengan mengurangkan reaksi-reaksi joist yang telah diperoleh:

$$R_N = 0{,}7275 w_T a L \quad \text{dan}$$

$\sum F_Y = 0$:

$$-R_{A_1} - R_{B_1} - R_{C_1} - R_{D_1} + R_M + R_N = 0$$

$$R_M = 0{,}7275 w_T a L$$

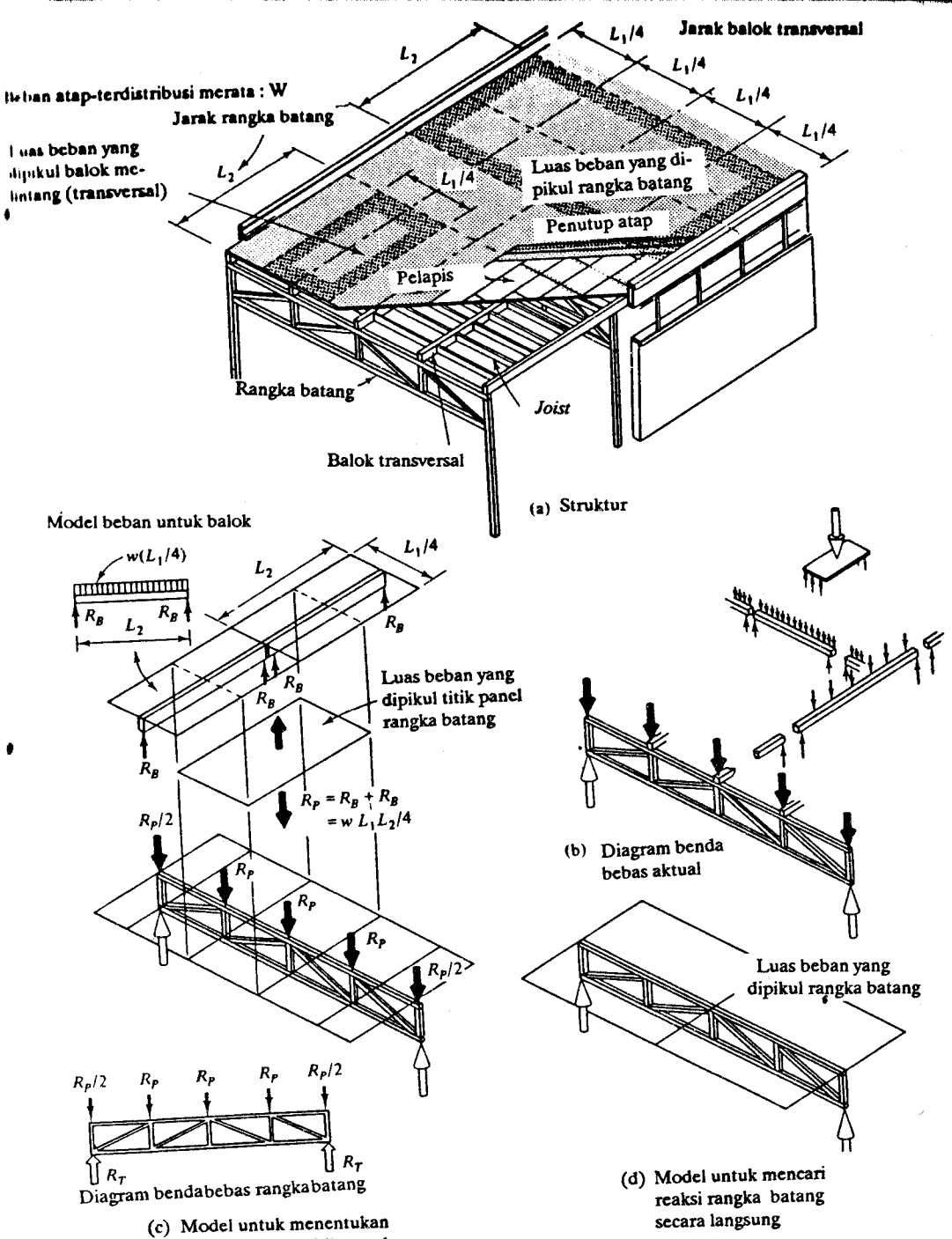
Ini adalah beban-beban pada kolom M dan N. Beban-beban tersebut pada dua kolom lainnya dapat diperoleh dengan proses serupa.

Jika L = 20 ft, a = 6 ft, dan w_T = 50 lb/ft^2, maka beban pada kolom M adalah R_M = 0,7275 $w_T aL$ = 0,7275(50 lb/ft^2) (6 ft) (20 ft) = 4365 lb. Beban pada kolom N juga sama.

Alternatif lain dengan satuan SI, asumsikan bahwa L = 6,1 m, a = 1,83 m, dan w_T = 244,1 kg/m^2. Langkah pertama adalah mengonversikan beban merata menjadi gaya; dengan demikian (244,1 x 9,807) = 2393,9 N/m^2 = 2,39 kN/m^2. Gaya pada kolom M adalah 0,7275 (2,39 kN/m^2) (1,83 m) (6,1 m) = 19,41 kN.

CONTOH

Tentukan gaya-gaya pada rangka batang interior pada struktur yang diilustrasikan pada Gambar 3.15. Tentukan pula reaksi untuk rangka batang yang dianalisis. Asumsikan bahwa beban-beban dan bentang sebagai berikut:



GAMBAR 3.15 Model beban

Solusi:

Bentang

L_1 = 60ft = 18,3 m
L_2 = 25 ft = 7,6 m

Beban:
Asumsikan bahwa beban hidup adalah 35 lb/ft² (1676 N/m²).
Asumsikan beban mati sebagai berikut:

Atap	7,0 lb/ft²	=	335 N/m²
Papan	2,5	=	120
joist, Balok	8,0	=	393
Rangka batang	4,0	=	191
Total	21,5 lb/ft²	=	1029 N/m²

Di sini berat *joist*, balok, dan rangka batang diestimasi dengan pendekatan beban terdistribusi ekuivalen. Hal ini sering dilakukan dalam tahap prarencana. Dengan menggunakan beban terdistribusi di atas dan beban hidup asumsi, beban terdistribusi total (mati + hidup) adalah:

$$35 + 21,5 = 56,5 \text{ lb/ft}^2 \text{ atau } 1678 + 1029 = 2705 \text{ N/m}^2$$

Gaya-gaya pada rangka batang:
Bagaimana beban hidup disalurkan terlihat pada Gambar 3.15(b). Mula-mula beban ini dipikul oleh dek atap, kemudian disalurkan ke *joist*. Reaksi yang diterima oleh dek menjadi gaya pada *joist*. Kemudian reaksi pada *joist* menjadi gaya pada balok transversal. Reaksi-reaksi balok transversal menjadi gaya-gaya pada titik-titik panel rangka batang. Besar gaya-gaya ini dapat ditentukan dengan menghitung setiap reaksi yang ada. Proses yang teliti ini, yaitu secara akurat merefleksikan bagaimana struktur memikul beban, bagaimana pun terasa berkepanjangan. Gaya-gaya pada titik-titik panel rangka batang dapat ditentukan lebih cepat dengan pendekatan alternatif yang melibatkan model seperti terlihat pada Gambar 3.15(c). Model ini didasarkan atas konsep kontribusi. Seperti terlihat, adalah mungkin untuk menentukan gaya yang ada pada titik panel rangka batang dengan menentukan porsi relatif atap yang bertindak sebagai luas konstribusi pada titik panel, kemudian dengan mudah mengalikannya dengan besar beban terdistribusi merata.

luas kontribusi untuk titik panel interior $= \left(\frac{L_1}{4}\right)(L_2) = \frac{L_1 L_2}{4}$

gaya titik-panel-interior $= R_p = \frac{w_T L_1 L_2}{4}$

$= \frac{(56,5 \text{ lb/ft}^2)(60 \text{ ft})(25 \text{ ft})}{4} = 21.187,5 \text{ lb}$

$= \frac{(2705 \text{ N/m}^2)(18,3 \text{ m})(7,6 \text{ m})}{4} = 94.053 \text{ N}$

luas kontribusi untuk titik panel eksterior $= \left(\frac{L_1}{8}\right)(L_2) = \frac{L_1 L_2}{8}$

gaya titik-panel-eksterior $= \frac{w_T L_1 L_2}{8} = \frac{R_p}{2}$

$= 10,593.75 \text{ lb}$

$= 47,026.5 \text{ N}$

Diagram benda-bebas untuk rangka batang terlihat pada Gambar 3.14(c).

Reaksi:
Reaksi pada rangka batang dapat diperoleh dengan menggunakan diagram benda-bebas seperti terli' pada Gambar 3.15(c). Dengan alasan simetri, reaksi khas adalah:

$$\frac{(R_e + R_p + R_p + R_p + R_p/2)}{2} = 42.375 \text{ lb} = 188.106 \text{ N}$$

Alternatif lain, kita dapat memperoleh reaksi rangka batang secara langsung (tanpa harus mencari gaya-gaya titik panel), yaitu dengan memandang model beban seperti terlihat pada Gambar 3.15(d). Gambar 3.15(d) mengilustrasikan porsi relatif permukaan atap total yang dipikul oleh rangka batang interior. Ini adalah luas kontribusi untuk rangka batang. Luas ini dapat digunakan untuk memperoleh beban total yang dipikul oleh rangka batang dan kemudian reaksinya. Gambar tersebut mengilustrasikan setiap reaksi yang mengambil bagian setengah dari luas beban kontribusi total.

luas kontribusi untuk rangka batang khas $= L_1 L_2$
gaya ke bawah total pada rangka batang $= w_T L_1 L_2$

$= (56,5 \text{ lb/ft}^2)(60 \text{ ft})(25 \text{ ft}) = 84.750 \text{ lb}$

$= (2705 \text{ N/m}^2)(18,3 \text{ m})(7,6 \text{ m}) = 376.212 \text{ N}$

Karena masing-masing rangka batang mempunyai reaksi yang simetris terhadap beban, maka setiap reaksi adalah setengah dari beban total, yaitu 84750/2 = 42375 lb atau 376212/2 = 188106 N. Angka-angka ini sama dengan yang telah diperoleh sebelum ini. Jelaslah bahwa untuk memperoleh reaksi rangka batang, kita dapat menggunakan prosedur ringkas demikian.

Perlu ditekankan bahwa penggunaan model beban berdasarkan luas kontribusi hanya berlaku apabila ketidaksimetrisan ekstrem, baik pada kondisi beban maupun pada strukturnya. Untuk kondisi beban parsial, kita perlu menghitung reaksi-reaksi setiap elemen dan memandangnya sebagai beban pada elemen lain yang memikulnya. Proses demikian dilakukan terus sampai reaksi pada fondasi diperoleh.

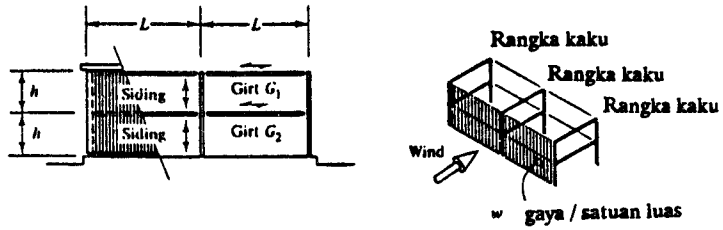
CONTOH

Tentukan gaya-gaya pada rangka struktur seperti terlihat pada Gambar 5.16, sebagai akibat dari aksi angin yang bekerja pada muka gedung.

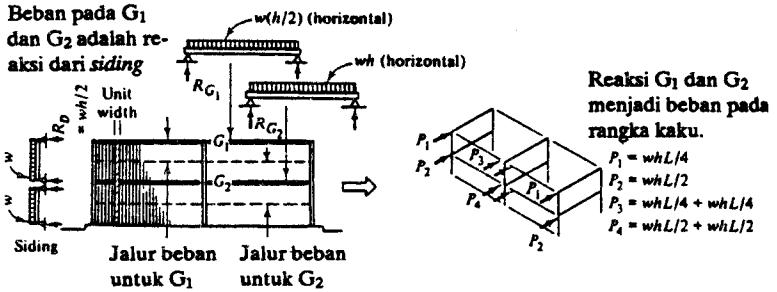
Solusi:

Gaya-gaya tersebut dapat ditentukan dengan meninjau setiap elemen dan menghitung reaksinya yang merupakan beban pada elemen yang menumpunya, atau dengan konsep luas kontribusi. Kedua metode itu diilustrasikan pada Gambar 3.16.

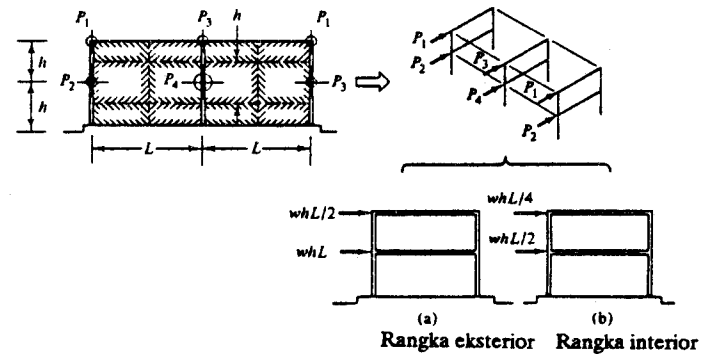
(a) Diagram struktural dasar dan sistem yang melingkupinya



(b) Pemodelan bagaimana beban angin ditransfer ke rangka kaku. Mula-mula gaya angin dipikul oleh sisi, kemudian ditransfer ke balok G_1 dan G_2 yang selanjutnya mentransfer ke rangka.



(c) Model yang disederhanakan untuk secara langsung menentukan beban-beban pada rangka. Beban-beban pada rangka kaku dapat ditentukan langsung dengan meninjau luas rangka kaku. Apabila rangka-rangka yang ada berbeda, luas beban juga akan berbeda-beda.



GAMBAR 3-16 Pemodelan beban angin pada rangka kaku.

SOAL

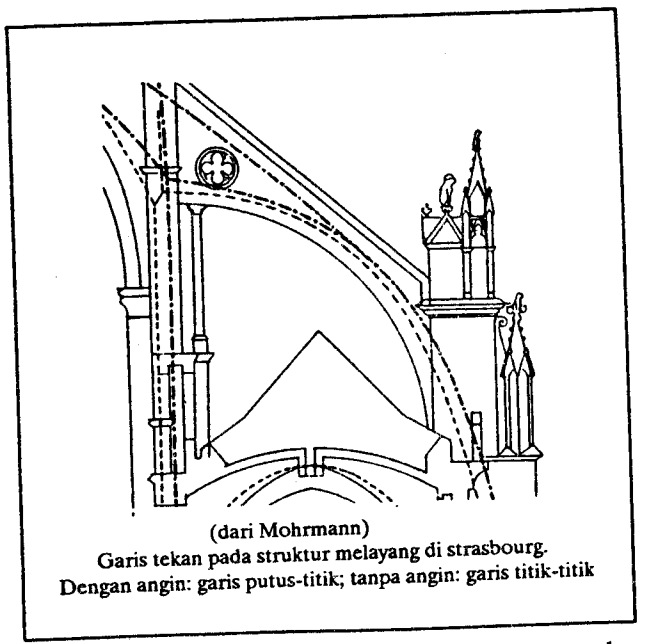
3-1. Carilah dua jembatan di sekitar tempat tinggal pembaca dan identifikasikan kondisi tumpuan yang ada (apakah sendi atau rol). Gambarlah sketsa tumpuan aktual dan diagram simbolis untuk merepresentasikan tumpuan tersebut.

3-2. Carilah dua jenis rangka batang yang berbeda yang digunakan dalam gedung di daerah tempat pembaca tinggal. Identifikasikan jenis kondisi tumpuannya. Gambarlah sketsa kondisi ujung aktual dan diagram simbolis yang digunakan untuk merepresentasikan tumpuan tersebut.

3-3. Perhatikan koridor khas di dalam gedung di sekitar tempat pembaca tinggal. Berapakah menurut estimasi pembaca beban hidup *aktual* dalam keadaan normal? Bagaimana kalau dalam keadaan kebakaran?

3-4. Berapakah beban salju dan angin yang direkomendasikan untuk gedung di daerah tempat tinggal pembaca? Carilah buku peraturan yang berlaku di daerah pembaca.

3-5. Pelajari kondisi beban aktual pada katedral *gothic* seperti terlihat pada Gambar 3.17. Bacalah literatur di perpustakaan.



(dari Mohrmann)
Garis tekan pada struktur melayang di strasbourg.
Dengan angin: garis putus-titik; tanpa angin: garis titik-titik

GAMBAR 3-17 Salah satu aspek nyata bagimana tangga melayang bekerja adalah kemampuannya memikul beban yang diakibatkan oleh angin, selain juga memikul beban vertikal.

Bagian II

PENDAHULUAN UNTUK ANALISIS DAN DESAIN

Sembilan bab dalam Bagian II ini secara sistematis membahas elemen-elemen struktural utama yang digunakan dalam konteks gedung. Setiap bab terdiri atas bagian pendahuluan yang mendefinisikan setiap elemen dan membahasnya secara kualitatif. Bagian selanjutnya menyajikan secara lebih rinci karakteristik struktural setiap elemen dan mendiskusikan prinsip-prinsip yang berguna dalam konteks desain.

Bab 4

RANGKA BATANG

4.1 PENDAHULUAN

Meskipun struktur-struktur yang tersusun atas batang-batang yang dihubungkan telah lama digunakan, uraian mendalam mengenai keuntungan struktural yang didapat dari batang linear yang digabung membentuk pola-pola segitiga belum lama ada. Struktur demikian disebut *rangka batang.* Rangka batang sederhana yang menggunakan batang relatif sedikit sering dijumpai pada atap. Rangka batang yang lebih kompleks hanya digunakan di sana-sini. Jembatan yang menggunakan rangka batang kayu, misalnya, telah dibuat menyeberangi Sungai Donau, dibangun oleh bangsa Romawi pada sekitar tahun 500 sebelum Masehi. Sekalipun demikian, contoh tersebut tidak memberikan pengaruh apa-pun terhadap metode mendirikan bangunan pada waktu itu. Arsitek Italia Andrea Palladio (1518–1580) telah memberikan ilustrasi mengenai struktur rangka batang berpola segitiga yang benar, dan menunjukkan bahwa ia memiliki pengetahuan tentang potensi dan cara struktur tersebut memikul beban. Setelah itu, rangka batang kadang-kadang digunakan pula pada gedung besar seperti Independence Hall, Philadelphia, tetapi lagi-lagi hal ini tidak memberikan pengaruh apa pun pada inovasi struktur. Para ahli jembatan pada abad kesembilan belaslah yang mulai secara sistematis mempelajari dan bereksperimen dengan potensi rangka batang. Hal ini dilakukan karena meningkatnya kebutuhan transportasi pada saat itu. *Traite de la Construction des Pont* oleh Emiland Gauthey (yang diterbitkan tahun 1809 dan 1813 setelah ia meninggal oleh keponakannya, ahli matematika Louis Navier, dari Ecole Polytechnic di Paris) memberikan dasar penting bagi karya-karya teoretis dalam bidang itu. Dalam buku tersebut Gauthey membahas apa yang disebutnya prinsip *keseimbangan posisi dan keseimbangan tahanan.* Yang disebut pertama adalah usaha awal untuk menguraikan gaya menjadi komponen pada batang individual. Yang disebut kedua membahas selanjutnya, sifat material dan ukuran batang.

Kontribusi yang penting mencakup tulisan klasik Squire Whipple mengenai teknik struktur, yaitu *A Work in Bridge Building,* diterbitkan pada tahun 1847. Dengan demikian, perkembangan rangka batang dibantu oleh dasar pengetahuan teoretis yang bersifat percobaan tetapi berkembang dengan cepat. Hal ini berbeda dengan bentuk struktur lain yang berkembang agak lambat dengan cara empiris. Tidak lama kemudian rangka batang menjadi jenis struktur yang umum digunakan pada teknik sipil untuk bentang yang panjang. Penggunaan rangka batang untuk gedung juga berkembang meskipun lebih lambat karena adanya perbedaan tradisi dan kebutuhan hingga akhirnya menjadi elemen umum dalam arsitektur modern.

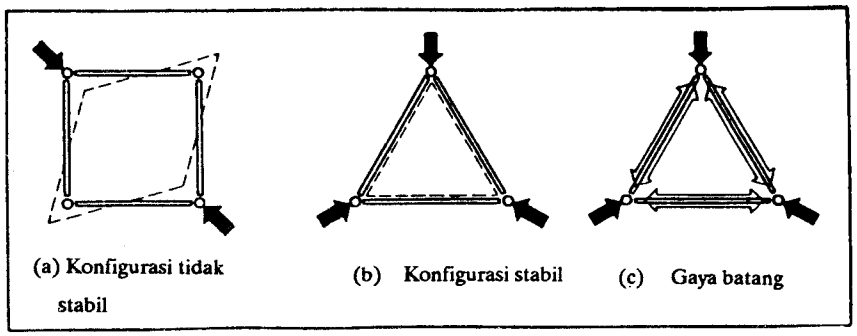
Berkembangnya rangka batang sebagai bentuk struktural utama berlangsung sangat cepat dan memberikan pengaruh yang sangat berarti. Bagian lain bab ini membahas apakah rangka batang itu, bagaimana bekerjanya, dan mengapa struktur tersebut menjadi bentuk struktural yang penting. Penyajiannya di sini merupakan penelitian terhadap elemen struktural khusus. Dalam taraf yang lebih umum, metode analisis dan desain yang dibahas untuk rangka batang ini dipakai untuk menunjukkan prinsip yang secara kasar dapat diterapkan pada analisis dan desain bentuk struktural lain.

4.2 PRINSIP–PRINSIP UMUM

4.2.1 Pembentukan Segitiga (Triangulasi)

Rangka batang adalah susunan elemen-elemen linear yang membentuk segitiga atau kombinasi segitiga, sehingga menjadi bentuk rangka yang tidak dapat berubah bentuk apabila diberi beban eksternal tanpa adanya perubahan bentuk pada satu atau lebih batangnya. Setiap elemen tersebut secara khas dianggap tergabung pada titik hubung *sendi* (lihat Bab 2.4.1 dan 3.3.2). Batang-batang disusun sedemikian rupa sehingga semua beban dan reaksi hanya terjadi pada titik hubungan tersebut.

Prinsip utama yang mendasari penggunaan rangka batang sebagai struktur pemikul beban adalah penyusunan elemen menjadi konfigurasi segitiga hingga menjadi bentuk stabil. Perhatikan kedua struktur terhubung sendi seperti terlihat pada Gambar 4-1(a) dan (b). Apabila struktur itu diberi beban seperti terlihat pada Gambar 4-1(a), maka akan ada deformasi masif. Ini adalah struktur tak stabil, yang membentuk *mekanisme runtuh (collapse)* apabila dibebani. Struktur demikian dapat berubah bentuk dengan mudah tanpa adanya perubahan pada panjang setiap batang. Sebaliknya, konfigurasi segitiga pada batang-batang seperti terlihat pada Gambar 4-1(b) tidak dapat berubah bentuk atau runtuh seperti contoh sebelumnya. Dengan demikian bentuk segitiga ini stabil. Setiap deformasi yang terjadi pada struktur stabil adalah minor dan diasosiasikan dengan perubahan panjang batang yang diakibatkan oleh gaya yang timbul di dalam batang sebagai akibat dari beban eksternal. Selain itu, sudut yang terbentuk di antara dua batang tidak berubah apabila struktur stabil tersebut dibebani. Hal ini sangat bertentangan dengan bentuk tidak stabil, yang sudut di antara dua batangnya berubah sangat besar [lihat Gambar 4-1(a)]. Juga jelas bahwa gaya eksternal menyebabkan timbulnya gaya pada batang-batang struktur bentuk stabil. Seperti yang akan dibahas secara lebih rinci pada Bab 4.3.2,

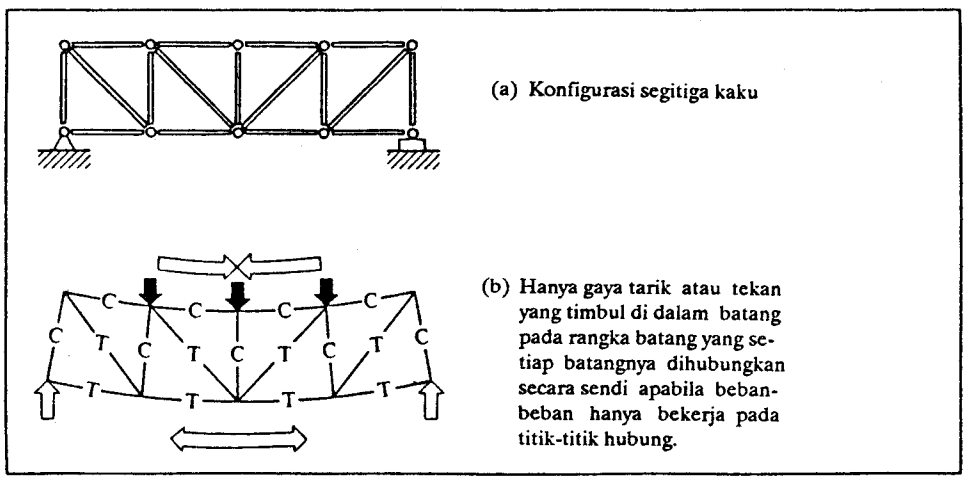


GAMBAR 4-1 Susunan batang yang stabil dan tidak stabil.

gaya-gaya yang timbul pada struktur tersebut adalah tarik atau tekan. Tidak ada lentur pada struktur tersebut.

4.2.2 Konfigurasi

Karena susunan segitiga dari batang-batang adalah bentuk yang stabil, maka sembarang susunan segitiga juga membentuk struktur stabil dan kaku seperti terlihat pada Gambar 4-2. Ide ini merupakan prinsip dasar penggunaan rangka batang pada gedung karena bentuk kaku yang lebih besar untuk sembarang geometri dapat dibuat dengan memperbesar segitiga-segitiga tersebut. Sekali lagi, efek beban eksternal menyebabkan keadaan tarik murni atau tekan murni pada setiap batang. Untuk rangka batang yang hanya memikul beban vertikal, pada batang tepi atas umumnya timbul gaya tekan, dan pada batang tepi bawah umumnya timbul gaya tarik. Gaya tarik atau tekan ini dapat timbul pada setiap batang, yang mungkin saja terjadi pola berganti-ganti tarik dan tekan.



GAMBAR 4–2 Struktur segitiga: Setiap struktur yang terdiri atas sekumpulan bentuk segitiga membentuk susunan kaku yang mampu memikul beban eksternal.

Hal yang amat penting pada rangka batang ialah bahwa struktur tersebut hanya dibebani oleh beban-beban terpusat. Apabila beban-beban tersebut bekerja langsung pada batang, maka akan timbul tegangan lentur pada batang tersebut, selain juga tegangan aksial tekan atau tarik yang umum ada pada rangka batang. Sebagai akibatnya, desain batang tersebut menjadi rumit, dan efisiensi keseluruhan batang menjadi berkurang.

4.2.3 Gaya Batang

Sebagaimana akan dibahas berikut ini, perilaku gaya-gaya dalam setiap batang pada rangka batang dapat digunakan dengan menerapkan persamaan dasar keseimbangan. Akan tetapi, untuk konfigurasi rangka batang sederhana, sifat gaya terebut (tarik atau tekan) dapat ditentukan dengan menrapkan sedikit teknik yang berguna dalam memberikan gambaran bagaimana rangka batang tersebut memikul beban.

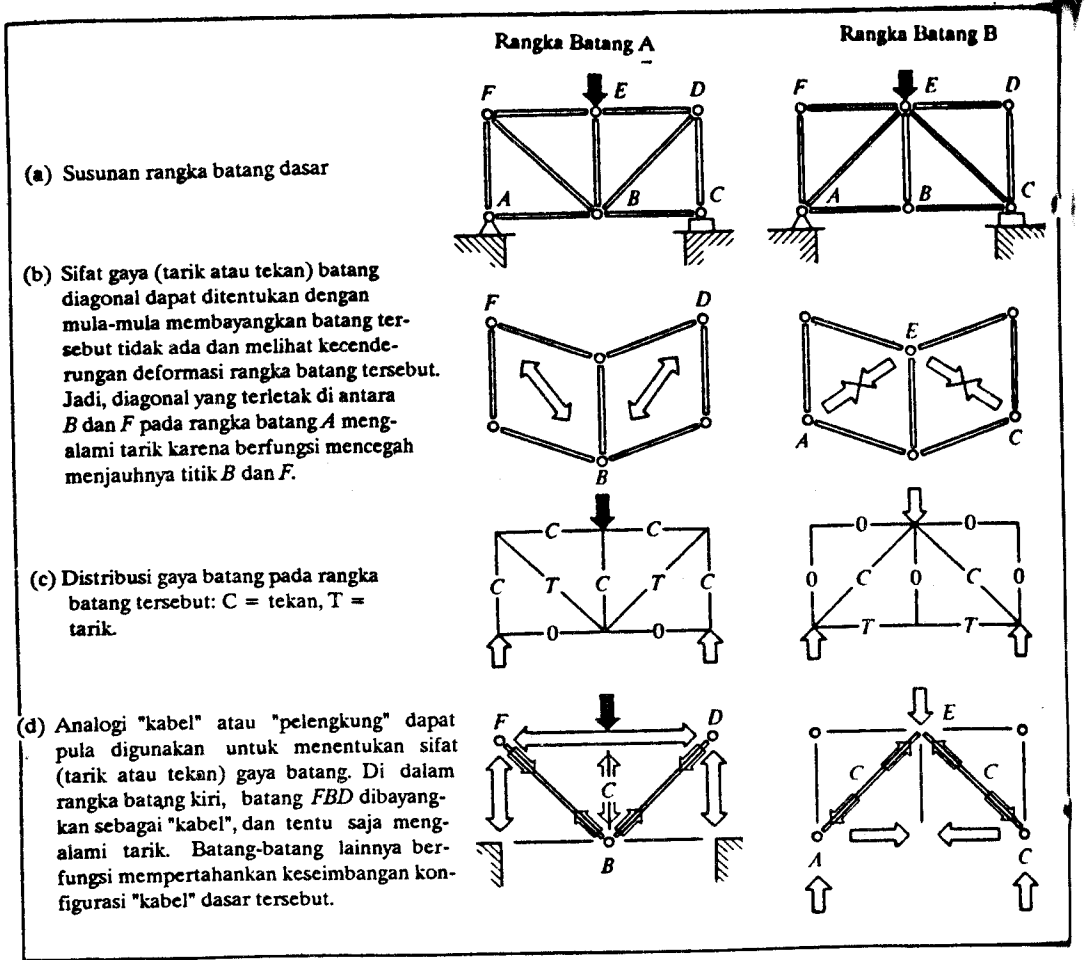
Salah satu cara untuk menentukan gaya dalam batang pada rangka batang adalah dengan menggambarkan bentuk berdeformasi yang mungkin dari struktur yang akan terlihat apabila batang yang hendak diketahui sifat gayanya *dibayangkan* tidak ada. Dengan demikians sifat gaya (tarik atau tekan) batang itu dapat diketahui berdasarkan analisis mengenai *pencegahan* deformasi tersebut.

Perhatikan batang-batang diagonal pada rangka batang A di dalam Gambar 4–3 (a). Apabila diagonal tersebut kita bayangkan tidak ada, maka susunannya akan berubah bentuk, seperti terlihat pada Gambar 4–3(b), karena konfigurasinya tidak segitiga. Agar diagonal dapat mencegah deformasi, jelas bahwa diagonal kiri dan kanan harus mencegah berubahnya jarak (berturut-turut titik B–F dan titik B–D. Dengan demikian, diagonal-diagonal yang terletak di antara titik-titik itu akan memanjang, yang artinya batang tersebut mengalami gaya tarik.

Batang-batang diagonal pada rangka batang B yang terlihat pada Gambar 4–3 harus berada dalam keaadaan tekan karena berfungsi untuk menjaga titik A–E dan C–E dari perubahan jarak mendekat.

Apabila kita tinjau batang BE pada kedua rangka batang, mudah untuk membayangkan apa yang akan terjadi pada titik-titik B dan E apabila batang BE tidak ada. Pada rangka batang A, titik *B* dan *E* akan mempunyai kecenderungan mendekat sehingga akan timbul gaya tekan pada setiap batang yang terletak di antara titik-titik tersebut. Akan tetapi, pada rangka batang B, apabila batang *BE* tidak ada, maka *tidak ada perubahan* bentuk struktur total karena masih tetap dalam keadaan stabil (konfigurasinya masih segitiga). Dengan demikian, batang tersebut tidak berperan langsung terhadap beban tersebut. Batang demikian disebut *batang nol.* Perhatikan bahwa batang *AF, FE, ED dan DC* pada rangka batang B juga merupakan batang nol berdasarkan alasan yang sama. Tentu saja hal ini tidak terjadi pada rangka batang A. Gaya-gaya pada kedua rangka batang A dan B diilustrasikan pada Gambar 4–3(c).

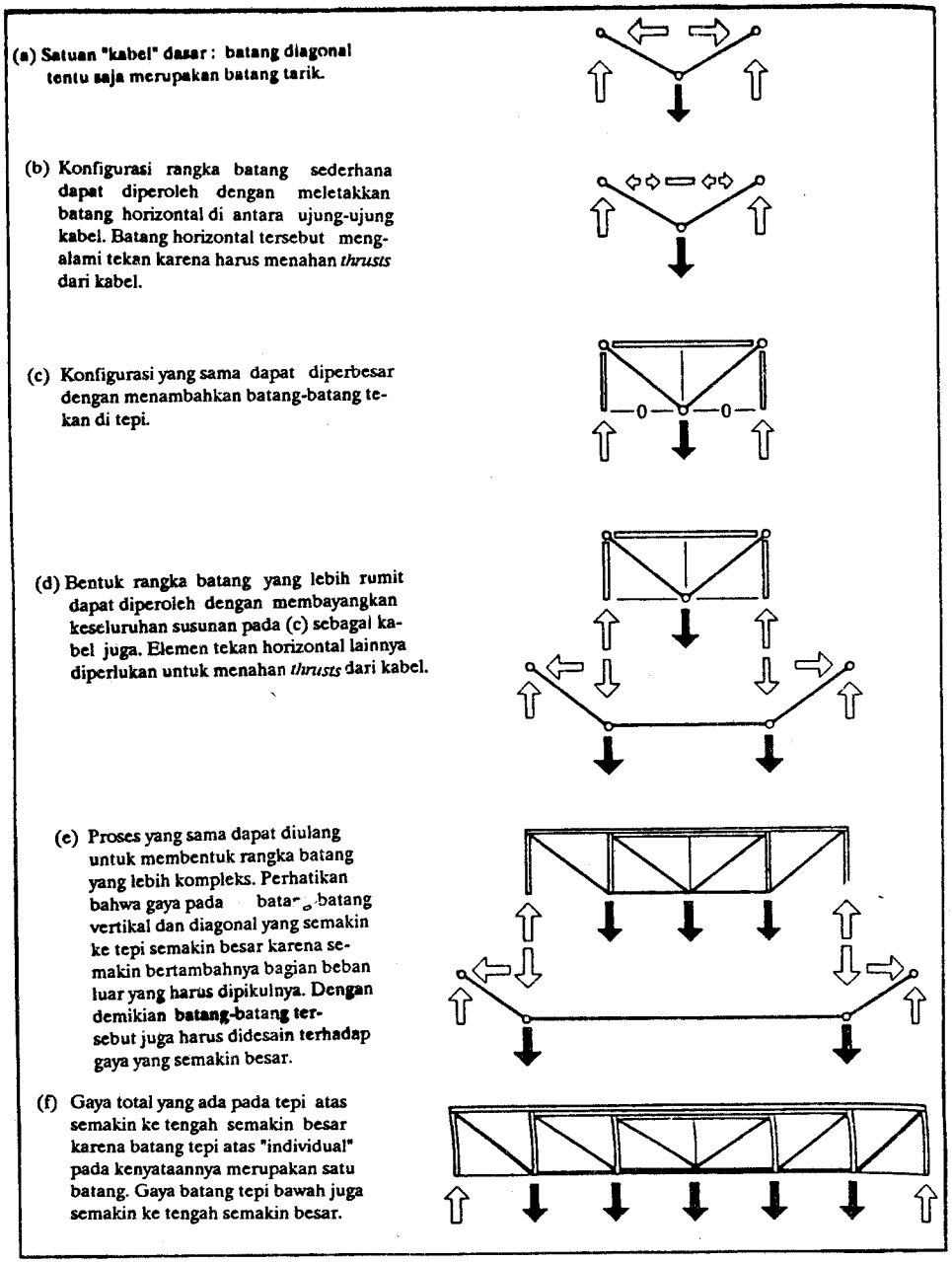
Cara lengkap lainnya untuk memperoleh gambaran tentang gaya-gaya pada suatu rangka batang ialah dengan menggunakan analogi *pelengkung* dan *kabel.* Jelaslah, misalnya, bahwa rangka batang A dapat dibayangkan sebagai kabel yang dilengkapi dengan batang-batang [lihat Gambar 4–3(d)]. Rangka batang B dapat dibayang-



GAMBAR 4–3 Gaya-gaya pada rangka batang: sifat gaya pada konfigurasi rangka batang sederhana dapat ditentukan dengan pendekatan. Pada rangka batang yang lebih rumit memerlukan pendekatan kuantitatif.

kan sebagai pelengkung linear sederhana yang dilengkapi dengan batang-batang. Dengan demikian, diagonal pada rangka batang A adalah diagonal tarik, sedangkan diagonal pada rangka batang B adalah diagonal tekan. Gaya-gaya pada batang lainnya dapat ditentukan dengan menganalisis setiap sifat pelengkung dan kabel. Seperti terlihat pada Gambar 4–4, gaya-gaya pada rangka batang yang lebih rumit juga dapat digambarkan dengan cara seperti yang telah disebutkan sebelum ini.

Jelaslah bahwa kedua metode yang telah dibahas di atas untuk menggambarkan gaya-gaya pada rangka batang akan menjadi sangat sulit bahkan tidak mungkin apabila diterapkan pada rangka batang yang terlalu kompleks. Metode untuk menggam-



GAMBAR 4–4 Analogi "kabel" pada analisis rangka batang: bentuk rangka batang kompleks dapat dibayangkan terdiri atas deretan satuan dasar yang lebih sederhana. Apabila arah diagonal berbalik, maka analogi yang digunakan adalah "pelengkung". Akan tetapi kedua analogi tersebut berguna hanya untuk bentuk-bentuk tertentu.

barkan gaya-gaya pada rangka batang demikian adalah berdasarkan tinjauan keseimbangan titik hubung yang akan dibahas berikut ini. Secara umum rangka batang kompleks memang harus dianalisis dengan metode-metode yang akan dibahas berikut ini.

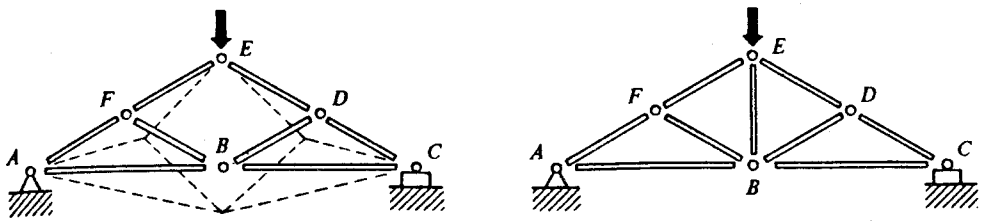
4.3 ANALISIS RANGKA BATANG

4.3.1 Stabilitas

Langkah pertama pada analisis rangka batang selalu menentukan apakah rangka batang itu mempunyai konfigurasi stabil atau tidak. Pada umumnya kita dapat mengatakan melalui pemeriksaan apakah suatu rangka batang stabil atau tidak akibat beban eksternal dengan memperhatikan secara bergiliran apakah setiap titik hubung selalu mempertahankan hubungan yang tetap terhadap titik hubung lain pada kondisi pembebanan tersebut. Secara umum, setiap rangka batang yang merupakan susunan bentuk dasar segitiga merupakan struktur yang stabil.

Pola susunan batang yang tidak segitiga secara umum merupakan pola yang harus dipandang dengan lebih hati-hati. Rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–5(a) tidak stabil dan akan runtuh apabila dibebani seperti tergambar. Jelas bahwa rangka batang ini tidak mempunyai jumlah batang cukup untuk mempertahankan hubungan geometri kaku antara titik-titik hubungnya. Apabila batang-batang lainnya dirancang cukup untuk beban tersebut, maka penambahan batang *BC* seperti terlihat pada Gambar 4–5(b) akan menjadikan konfigurasi stabil.

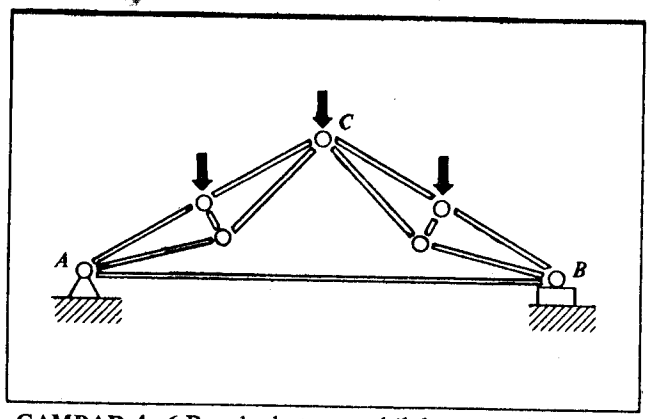
Perlu diperhatikan bahwa rangka batang dengan satu atau lebih konfigurasi bukan segitiga dapat saja merupakan struktur stabil. Pada Gambar 4–6 terlihat struktur tersebut. Struktur rangka batang ini terdiri atas sekumpulan pola batang segitiga yang dihubungkan hingga berpola bukan segitiga, tetapi masih merupakan struktur stabil. Kelompok segitiga di antara *A* dan *C* membentuk pola kaku, begitu



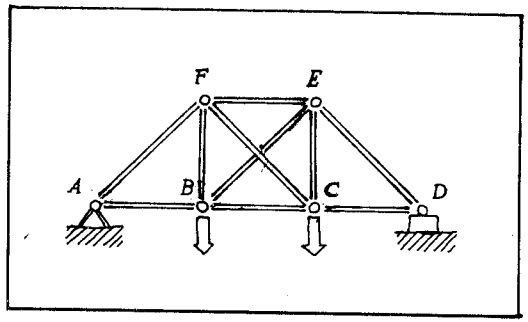
(a) Rangka batang tak stabil: daerah yang tidak segitiga pada rangka batang akan sangat berubah bentuk apabila mengalami suatu kondisi pembebanan, yang dapat disebut terjadinya keruntuhan rangka batang tersebut.

(b) Rangka batang stabil: pola batang yang seluruhnya segitiga.

GAMBAR 4–5 Konfigurasi batang stabil dan tidak stabil.



GAMBAR 4–6 Rangka batang stabil dengan pola batang bukan segitiga.

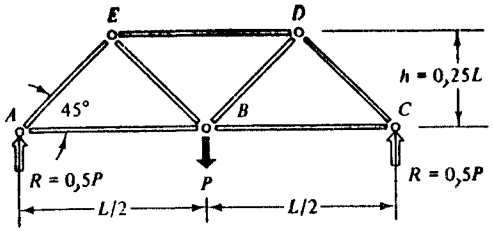


GAMBAR 4–7 Rangka batang stabil yang jumlah batangnya melebihi yang diperlukan untuk kestabilan.

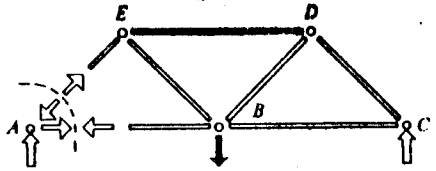
pula yang ada di antara *B* dan *C* sehingga posisi relatif *C* ke titik *A* dan *B* dapat dipertahankan, yang berarti rangka batang tersebut stabil. Kumpulan segitiga di antara *A* dan C dapat dipandang sebagai "batang", begitu pula di antara *B* dan *C*.

Pada satu rangka batang kita dapat menggunakan batang melebihi minimum yang diperlukan untuk kestabilan. Sebagai contoh adalah rangka batang pada Gambar 4–7. Salah satu batang diagonalnya dapat dipandang sebagai redundan. Batang *BE* atau *CF* dapat dibuang dan konfigurasi yang tertinggal akan tetap stabil. Jelaslah bahwa apabila dibuang kedua-duanya, konfigurasi yang tertinggal tidak stabil.

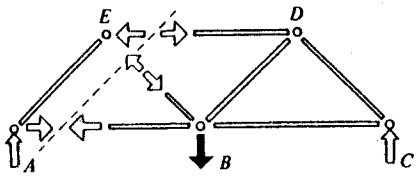
Pentingnya penentuan apakah konfigurasi batang stabil atau tidak dapat dilebih-lebihkan karena hal ini dapat membahayakan. Keruntuhan total dapat langsung terjadi kalau struktur tak stabil dibebani. Pola yang tidak biasa sering kali menyulitkan penyelidikan kestabilannya. Sebagai pembantu dalam menentukan kestabilan rangka batang bidang digunakan persamaan aljabar yang menghubungkan banyak titik hubung pada rangka batang dengan banyak batang yang diperlukan untuk kesabilan. Apabila n adalah banyak batang yang diperlukan, dan j adalah banyak titik hubung, maka $n = 2j - 3$.



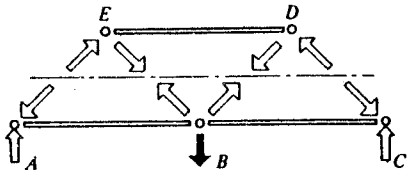
(a) Rangka batang dasar



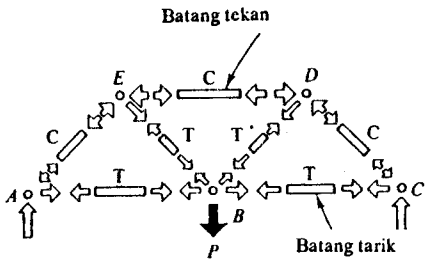
(b) Diagram benda bebas titik kumpul A



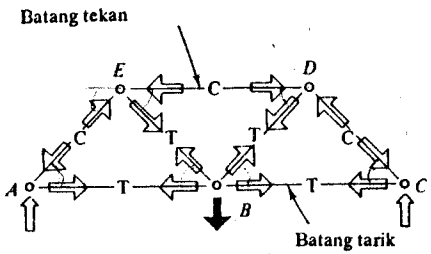
(c) Diagram benda bebas batang AE



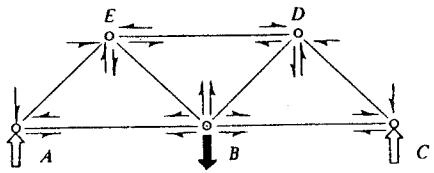
(d) Diagram benda bebas batang ED dan AC



(e) Penguraian rangka batang atas titik kumpul dan batang



(f) Diagram yang disederhanakan memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada setiap titik kumpul.



(g) Diagram yang disederhanakan memperlihatkan komponen gaya yang bekerja pada titik kumpul.

GAMBAR 4–8 Diagram benda bebas pada rangka batang. Diagram ini didasarkan pada prinsip dasar bahwa sembarang struktur atau sembarang bagian dari struktur harus berada dalam keseimbangan. Diagram benda bebas pada (e), (f), dan (g) digunakan sebagai solusi gaya batang dengan metode keseimbangan titik hubung.

Kita akan mencoba menggunakan persamaan ini pada contoh berikut. Perhatikan rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–8(a). Dalam hal ini, $j = 5$ sehingga harus ada $2(5) - 3$ atau 7 batang. Ini adalah jumlah batang minimum yang diperlukan agar rangka batang tersebut stabil. Karena rangka batang itu memang mempunyai 7 batang, maka konfigurasi tersebut stabil. Pada umumnya dapat dikatakan bahwa apabila jumlah batang lebih kecil daripada yang diperlukan, maka strukturnya tidak stabil; sedangkan apabila jumlahnya lebih besar dari yang diperlukan, maka strukturnya mengandung redundan. Akan tetapi, persamaan di atas belum cukup, dan tidak boleh begitu saja digunakan sebagai ganti penyelidikan visual untuk menentukan kestabilan struktur. Persamaan itu hanya merupakan indikator apakah suatu gaya batang pada struktur dapat dihitung dengan persamaan keseimbangan saja atau tidak, dan sebenarnya tidak ditujukan untuk meninjau kestabilan. Sekalipun demikian, persamaan tersebut memang dapat digunakan sebagai petunjuk awal kestabilan karena kita tidak dapat menghitung gaya-gaya pada struktur tidak stabil dengan persamaan statika.

4.3.2 Gaya Batang: Umum

Bagian ini membahas metode analisis untuk menentukan distribusi dan perilaku (tarik atau tekan) gaya batang pada struktur rangka batang yang karakteristik geometri serta bebannya diketahui. Metode analisis yang digunakan serupa dengan yang telah dipakai pada Bab 2 sehubungan dengan keseimbangan keseluruhan struktur. Prinsip yang mendasari teknik analisis yang dikembangkan dalam bagian ini adalah bahwa setiap struktur, atau *setiap bagian dari setiap struktur,* harus berada dalam keadaan seimbang. Prinsip ini merupakan kunci utama dalam analisis rangka batang. Langkah pertama dalam menganalisis rangka batang adalah mengisolasi bagian dari struktur dan meninjau sistem gaya yang bekerja pada bagian tersebut. Apabila sebagian dari gaya-gaya tersebut diketahui, biasanya gaya yang lainnya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dasar statika karena bagian tersebut harus berada dalam keadaan seimbang. Persamaan statika ini hanyalah pernyataan formal dari pemikiran bahwa setiap kumpulan gaya yang bekerja pada suatu bagian, baik internal maupun eksternal, harus mempunyai resultan sebesar nol.

Besar bagian struktur yang ditinjau tidak dibatasi. Kita dapat meninjau suatu bagian yang terdiri atas beberapa titik dan batang dari rangka batang ataupun satu titik hubungnya saja. Untuk mendapat gaya internal yang ada pada lokasi tertentu pada suatu struktur, struktur itu harus dipisahkan pada lokasi tersebut. Gambar 4–8(b)–(e) mengilustrasikan diagram benda bebas dari rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–8(a). Setiap bagian tersebut harus berada dalam keadaan seimbang pada sistem gaya yang ada. Sistem gaya yang dimaksud bukan hanya beban eksternal pada bagian itu, melainkan juga gaya internal pada bagian tersebut. Gaya internal ini adalah gaya batang yang timbul akibat adanya beban pada keseluruhan rangka batang, yang juga merupakan gaya yang diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan bagian rangka batang yang ditinjau. Dalam meninjau keseimbangan, kita dapat memandang gaya internal tersebut sebagai gaya yang diberikan. Pada

lokasi di mana rangka batang dipotong, gaya internal pada satu bagian akan sa besar dan berlawanan arah dengan yang ada pada bagian sebelahnya. Hal ini ha dasarkan pembahasan pada Bab 2.4.1, yaitu hukum Newton ketiga yang menguta bahwa aksi dan reaksi pada elemen yang saling berhubungan sama besar dan ber lawanan arah. Karena batang-batang pada rangka batang mempunyai hubungan sendi, maka ujung-ujungnya bebas berotasi, yang artinya hanya ada gaya, tidak ada momen, yang dapat diteruskan dari satu batang ke batang lainnya. Dengan demikian, hanya vektor gaya yang tampak pada diagram benda bebas. ini berarti pula bahwa gaya pada kedua ujung suatu batang harus kolinear (dengan menganggap batang itu sendiri tidak dibebani langsung agar batang tersebut berada dalam keadaan seimbang (lihat pembahasan pada Bab 2.3.2 mengenai batang-tanpa-gaya). Jadi, batang tersebut segaris dengan gaya pada ujung-ujungnya, yang berarti bahwa batang tersebut mengalami gaya normal, dan tidak mengalami momen lentur.

4.3.3 Keseimbangan Titik Kumpul

Keseimbangan Titik-titik pada Rangka Batang. Fakta bahwa setiap bagian pada setiap struktur harus berada dalam keadaan keseimbangan adalah dasar semua ana lisis rangka batang untuk mencari gaya batang. Pada analisis rangka batang dengan metode *titik kumpul (titik hubung, joints)*, rangka batang dianggap sebagai gabungan batang dan titik kumpul. Gaya batang diperoleh dengan meninjau keseimbangan titik-titik kumpul. Setiap titik kumpul harus berada dalam keseimbangan.

Gambar 4–8(e) mengilustrasikan rangka batang khas yang telah diuraikan atas kumpulan elemen-elemen linear dan titik kumpul ideal. Diagram benda bebas untuk semua titik kumpul dan batang juga diperlihatkan.

Dengan meninjau titik-titik kumpul saja, terlihat bahwa sistem gaya yang bekerja pada setiap titik kumpul terdiri atas gaya batang yang berkumpul padanya dan beban eksternal yang bekerja padanya. Seperti terlihat pada Gambar 4–8(e), gaya batang pada titik kumpul sama dan berlawanan arah dengan yang bekerja pada batang. Setiap titik kumpul harus berada dalam keadaan seimbang. Sistem gaya yang bekerja pada titik kumpul bekerja melalui titik yang sama. Hal ini berarti bahwa peninjauan keseimbangan yang diperlukan hanyalah translasi. Keseimbangan rotasi tidak perlu ditinjau karena semua gaya melalui satu titik, yaitu titik kumpul yang bersangkutan. Ini adalah kunci dalam analisis rangka batang dengan metode keseimbangan titik kumpul. Untuk rangka batang bidang, dua persamaan keseimbangan statika independen dapat dinyatakan sebagai $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$. Dengan demikian, dua gaya batang yang belum diketahui dapat diperoleh. Apabila suatu titik kumpul yang hanya terdiri atas dua gaya yang belum diketahui ditinjau terlebih dahulu, maka kedua gaya tersebut dapat langsung diperoleh dengan menggunakan dua persamaan statika (pada struktur rangka batang bidang) itu. Titik awal analisis biasanya adalah titik tumpuan di mana reaksi telah dihitung terlebih dahulu, dan biasanya di titik tersebut hanya dua gaya yang belum di ketahui, yaitu gaya batang yang bertemu pada titik tersebut. Apabila gaya suatu batang telah diketahui dari keseimbangan pada satu titik kumpul, maka kita dapat

meninjau titik kumpul berikutnya di mana gaya batang tersebut sekarang sudah diketahui. Hal ini terus dilakukan berurutan untuk setiap titik kumpul hingga semua gaya batang diperoleh. Proses itu akan lebih jelas dengan mempelajari contoh berikut ini.

Terlebih dahulu kita akan membahas *perjanjian arah panah.* Anak panah melukiskan secara grafis arah gaya-gaya yang ada pada elemen. Dengan demikian, anak panah yang terlihat pada batang *DE* dalam Gambar 4–8(e) digunakan untuk menunjukkan bahwa gaya pada batang tersebut akibat beban yang ada adalah gaya tekan. Sebaliknya, anak panah yang terlihat pada batang *BC* dalam Gambar 4–8(e) digunakan untuk memperlihatkan bahwa batang tersebut mengalami tarik. Pada titik kumpul, arah anak panah ini berlawanan dengan yang pada batang. Dengan demikian, aksi batang *DE* (yang mengalami tekan) adalah menekan titik *E*. Demikian pula aksi batang *BC* (yang mengalami tarik) adalah menarik titik *C*.

Analisis gaya batang dengan metode keseimbangan titik kumpul pada umumnya dapat dikerjakan berurutan, titik demi titik. Untuk rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–8, langkah pertama adalah menggambarkan sekumpulan diagram benda bebas seperti terlihat pada Gambar 4–8(e). Alternatif lain ialah dengan menggambarkan diagram benda bebas titik-titik kumpul [lihat Gambar 4–8(f)]. Persamaan keseimbangan translasi ($\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$) diterapkan pada setiap titik kumpul. Dalam menggambarkan diagram benda bebas dan persamaan keseimbangan tersebut, gaya yang belum diketahui perlu dimisalkan dahulu sifatnya, tarik atau tekan. Benar-tidaknya pemisalan ini akan terlihat dari tanda aljabar gaya yang diperoleh dari persamaan keseimbangan. Apabila bertanda positif, berarti arah pemisalan sudah benar; dan bila bertanda negatif, berarti arah kenyataan berlawanan dengan pemisalan.

Untuk mendapat intuisi dalam mencari distribusi gaya di dalam struktur, kita dapat menggunakan tinjauan kualitatif keseimbangan setiap titik kumpul. Perhatikan titik kumpul *A* dalam Gambar 4–8(e) sampai (g). Terlihat bahwa arah yang tergambar secara intusitif adalah arah yang benar. Reaksi tentu saja berarah ke atas. Agar keseimbangan pada arah vertikal diperoleh, harus ada gaya yang berarah ke bawah. Hanya gaya *AE* dari kedua gaya batang pada titik kumpul tersebut yang mempunyai komponen dalam arah vertikal sehingga dapat mengimbangi reaksi yang berarah ke atas. Batang *AB* adalah horizontal, jadi tidak mempunyai komponen dalam arah vertikal. Dengan demikian, gaya *AE* harus berarah ke bawah, yang berarti batang *AE* berada dalam keadaan tekan. Jika gaya *AE* mempunyai arah seperti tergambar, berarti komponen horizontalnya berarah ke kiri. Agar titik kumpul tersebut berada dalam kondisi keseimbangan horizontal, harus ada gaya lain yang mempunyai komponen horizontal yang berarah ke kanan. Reaksi hanya bekerja vertikal. Dengan demikian, gaya *AB* harus bekerja ke kanan agar keseimbangan horizontal tercapai. Ini berarti bahwa batang *AB* berada dalam keadaan tarik. Selanjutnya, perhatikan titik hubung *E* dengan mengingat hasil sebelumnya bahwa batang *AE* adalah batang tekan. Jelaslah bahwa batang *EB* harus berupa tarik agar mempunyai komponen gaya berarah ke bawah yang diperlukan untuk mengimbangi gaya yang berarah ke atas dari batang

AE. Batang *ED* horizontal sehingga tidak dapat mempunyai kontribusi dalam ar vertikal. Karena gaya-gaya *AE* dan *EB* bekerja dalam arah-arah seperti tergambar maka keduanya mempunyai komponen horizontal yang berarah ke kanan. Dengan demikian, gaya batang *RD* harus berarah ke kiri. Jadi, batang *ED* mengalami gaya tekan. Karena rangka batang tersebut beserta bebannya simetris, maka gaya batang lainnya dapat dengan mudah diperoleh (*DC* tekan, *BC* tarik, dan *DB* tarik). Perhatikan bahwa titik kumpul *B* juga berada dalam keseimbangan. Dengan demikian, keadaan tegangan pada semua batang dapat ditentukan secara kualitatif, tanpa menggunakan perhitungan. Proses tersebut tidak mungkin dilakukan pada sembarang rangka batang ataupun sembarang beban. Pendekatan kualitatif tentu saja tidak memberikan besar numerik gaya batang. Gaya tesebut dapat diperoleh dengan cara menuliskan persamaan keseimbangan dan memecahkannya hingga mendapat gaya-gaya batang. Proses matematis ini secara konseptual sama saja dengan prosedur kualitatif yang disebutkan di atas. Kedua-duanya didasarkan atas prinsip bahwa setiap elemen dari suatu struktur harus seimbang. Untuk mendapat besar numerik gaya batang, setiap titik kumpul ditinjau bergantian. Berikut ini dicantumkan contoh perhitungannya, dengan sumbu acuan vertikal dan horizontal.

CONTOH

Tentukan semua gaya batang pada rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–8.

Solusi:

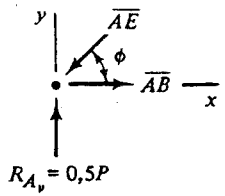
TITIK KUMPUL A

Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma_y = 0 \uparrow +$:

$$\underbrace{+ \ 0{,}5P}_{\text{reaksi } R_{Av} \text{ dalama arah vertikal}} \quad - \quad \underbrace{\overline{AE} \sin 45^o}_{\text{komponen vertikal gaya batang } AE\text{; gaya batang dimisalkan tekan}} \quad = \quad 0$$

$$\overline{AE} = + 0{,}707P \text{ (tekan)}$$

Batang *AE* bertanda positif, berarti sesuai dengan pemisalan, yaitu tekan.



Titik A

Keseimbangan dalam arah horizontal: $\Sigma F_x = 0 \rightarrow +$:

$$\underbrace{\overline{AE} \cos 45^o}_{\text{komponen horizontal gaya batang } AE} \quad + \quad \underbrace{\overline{AB}}_{\text{gaya batang } AB\text{, dimisalkan tarik}} \quad = \quad 0$$

Karena $\overline{AE}$ telah diketahui, maka $\overline{AB}$ dapat diperoleh secara langsung:

$$\overline{AB} = + 0{,}5P \quad \text{(tarik)}$$

Karena bertanda positif, maka batang *AB* adalah tarik, sesuai dengan pemisalan. Langkah selanjutnya adalah meninjau titik kumpul lain yang terdekat. Pada titik kumpul *B* ada tiga gaya batang yang belum diketahui, sedangkan persamaan keseimbangan hanya dua. Pada titik kumpul *E* hanya ada dua gaya yang belum diketahui sehingga kita dapat meninjaunya terlebih dahulu.

TITIK KUMPUL E

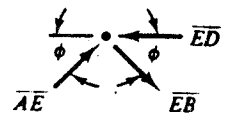
Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0 \uparrow +$:

$$+ \ \overline{AE} \sin 45^o - \overline{EB} \sin 45^o = 0$$

Karena $\overline{AE}$ telah diketahui, maka $\overline{EB}$ dapat diperoleh:

$$\overline{EB} = + \ 0{,}707P \quad \text{(tarik)}$$

Karena hanya kedua gaya tersebut yang mempunyai komponen dalam arah vertikal pada titik kumpul tersebut, maka kedua komponennya haruslah sama besar. Karena sudut keduanya sama, maka berarti kedua gaya batang tersebut sama. Dengan demikian, gaya batang *EB* dapat diperoleh dengan cepat.



Titik kumpul E

Keseimbangan dalam arah horisontal: $\Sigma F_x = 0 \rightarrow +$:

$$\overline{AE} \cos 45^o + \overline{EB} \cos 45^o - ED = 0$$

atau

$$\overline{ED} = 1{,}0P \quad \text{(tekan)}$$

$\overline{ED}$ hanya merupakan jumlah dari komponen horizontal kedua diag
Proses selanjutnya adalah meninjau titik kumpul berikutnya, dapat *B* *ataupun D*

TITIK KUMPUL B

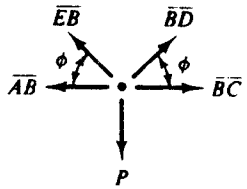
Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0 \uparrow +$:

$$\overline{EB} \sin 45^o + \overline{BD} \sin 45^o - P = 0$$

Karena $\overline{EB}$ telah diketahui, maka $\overline{BD}$ dapat diperoleh dari

$$\overline{BD} = 0{,}707P \text{ (tarik)}$$

Dengan alasan simetri, juga akan diperoleh hasil yang sama, yaitu *BD* harus deng
EB karena rangka batang tersebut simetris secara geometris dan dibebani secar
simetris pula.



Titik kumpul B

Keseimbangan dalam arah horizontal: $\Sigma F_x = 0 \rightarrow +$:

$$-\overline{AB} + \overline{BC} - \overline{EB} \cos 45^o + \overline{BD} \cos 45^o = 0$$

atau

$$\overline{BC} = 0{,}5P \quad \text{(tarik)}$$

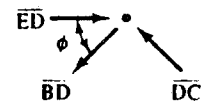
TITIK KUMPUL D

Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0 \uparrow +$:

$$-\overline{BD} \sin 45^o + \overline{DC} \sin 45^o = 0$$

atau

$$\overline{DC} = 0{,}707P \text{ (tekan)}$$



Titik kumpul *D*

Keseimbangan dalam arah horisontal: $\Sigma F_x = 0 \rightarrow +$:

$$+\overline{ED} - \overline{DB} \cos 45^o - DC \cos 45^o = 0$$

atau

$$1{,}0P - 0{,}707 \cos 45^o - 0{,}707 \cos 45^o = 0$$

Semua gaya telah diperoleh, dan persamaan di atas memang sama dengan nol. Ini adalah pengontrolan yang baik mengenai ketelitian perhitungan.

TITIK KUMPUL C

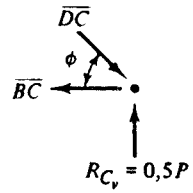
Keseimbangan dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0 \uparrow +$:

$$-\overline{DC} \sin 45^o + 0{,}5P = 0$$

atau

$$-0{,}707\,P \sin 45^o + 0{,}5\,P = 0$$

Sekali lagi, persamaan digunakan sebagai pengecekan karena semua gayanya telah diketahui.



Titik kumpul C

Keseimbangan dalam arah horisontal: $\Sigma F_x = 0 \rightarrow$;

$$-\overline{BC} + \overline{DC} \cos 45^o = 0$$

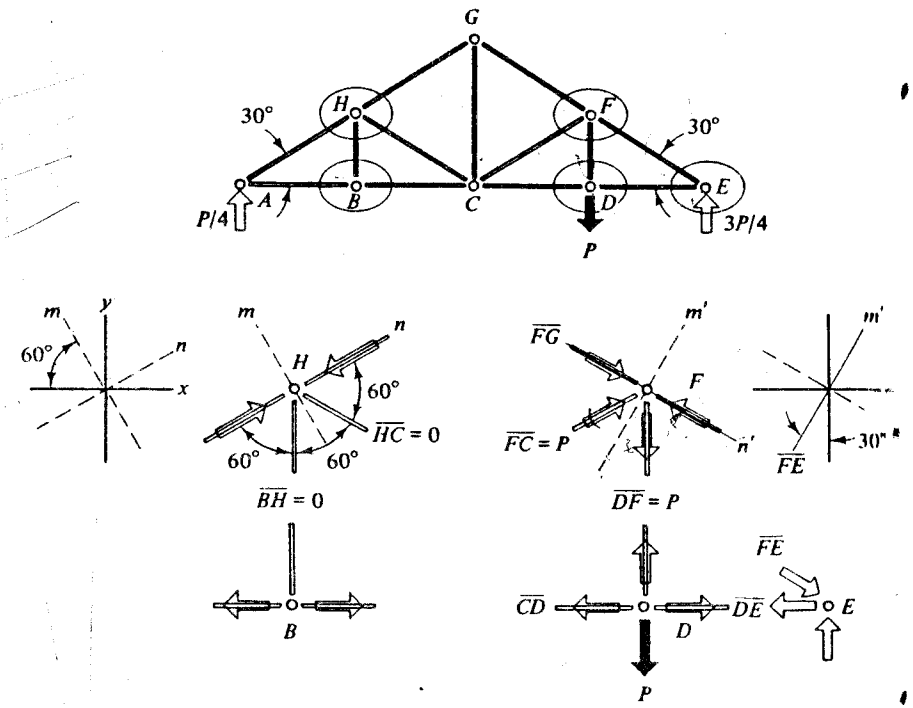
atau

$$-0{,}5P + 0{,}707P \cos 45^o = 0$$

Juga persamaan keseimbangan ini digunakan sebagai pengecekan karena semua gaya batangnya telah diketahui.

CONTOH

Tentukan gaya-gaya batang *FC* dan *FG* pada rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–9.



GAMBAR 4–9 Penggunaan sistem sumbu yang diputar.

Solusi:

TITIK KUMPUL E

$\sum F_y = 0 \quad -\overline{EF}\sin 30° + 3P/4 = 0$ atau $\overline{EF} = 1.5P$ (tekanan)

$\sum F_x = 0 \quad \overline{EF}\cos 30° - \overline{DE} = 0$ atau $\overline{DE} = 1.3P$ (tarik)

TITIK KUMPUL D

$\sum F_y = 0 \quad \overline{DE} - \overline{CD} = 0$ atau $\overline{CD} = 1.3P$ (tarik)

$\sum F_x = 0 \quad -P + \overline{FD} = 0$ atau $\overline{FD} = 1.0P$ (tarik)

TITIK KUMPUL F

$\sum F_y = 0 \quad -\overline{FD} + \overline{EF}\sin 30° - \overline{FG}\sin 30° + \overline{FC}\sin 30° = 0$

$\sum F_x = 0 \quad -\overline{EF}\cos 30° + \overline{FG}\cos 30° + \overline{FC}\cos 30° = 0$

FD dan EF telah diketahui. Setiap persamaan masih melibatkan dua gaya yang belum diketahui, yaitu *FG* dan *FC*. Denan memecahkan dua persamaan simultan tersebut diperoleh:

$\overline{FG} = 0{,}5P$ (tekan)

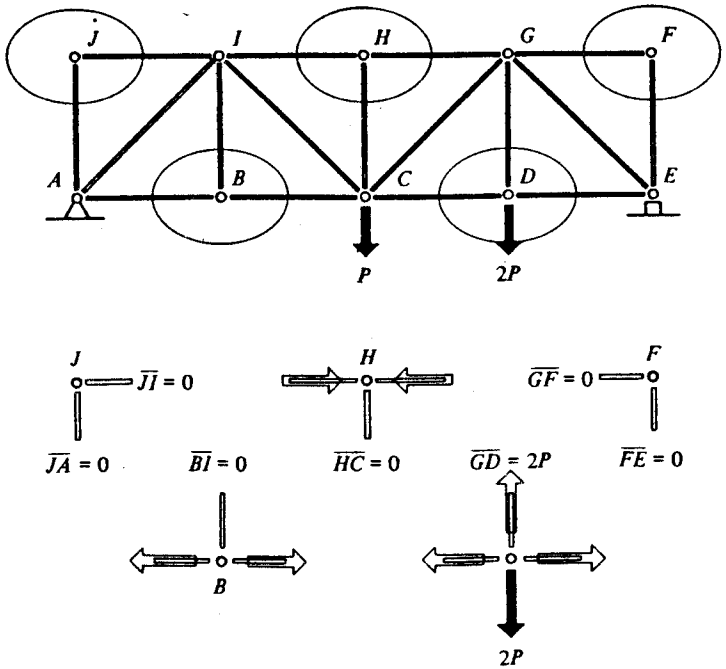
$\overline{FC} = 1{,}0P$ (tarik)

Kita dapat juga menggunakan sistem sumbu acuan yang dirotasikan ($m' - n'$), tidak dengansumbu vertikal-horizontal. Jadi pada sumbu m' – n':

$\sum F_{m'} = 0 \quad -\overline{FD}\sin 60° + \overline{FC}\sin 60° = 0 \quad \overline{FC} = 1{,}0P$

$\sum F_{n'} = 0 \quad \overline{FD}\cos 60° + \overline{FC}\cos 60° - \overline{EF} + \overline{FG} = 0 \quad \overline{FG} = 0{,}5P$

Kondisi Lebih sederhana. Sering kali analisis rangka batang dengan menggunakan metode keseimbangan titik kumpul dapat dilakukan lebih cepat dengan memperhatikan kondisi-kondisi khusus yang sering ada. Salah satunya adalah adanya batang *bergaya nol* (batang nol). Perhatikan rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–10 pada titik hubung *B*. Dengan meninjau keseimbangan titik kumpul tersebut dalam arah vertikal, jelaslah bahwa pada batang *BI* tidak ada gaya sama sekali. Di sana tidak ada beban eksternal, dan batang *BC* serta *BA* terletak horizontal, jadi tidak ada komponen dalam arah vertikal. Apabila pada batang *BI* ada gaya batang, maka titik *kumpul* B tidak seimbang. Dengan demikian haruslah batang *BI* merupakan batang nol. Hal yang sama juga terjadi pada batang BC. Dengan memperhatikan keseimbangan titik kumpul *J* dalam arah vertikal serta horizontal, terlihat bahwa kedua batang yang bertemu *(JA* dan *JI)* adalah batang nol. Pada titik kumpul F juga terjadi hal yang sama.



GAMBAR 4–10 Kondisi yang menyebabkan analisis rangka batang menjadi lebih sederhana

Analisis dengan memilih batang-batang dan titik kumpul untuk menentukan gaya batang juga dapat diterapkan pada titik kumpul yang ada beban eksternalnya. Dengan meninjau titik kumpul *D* pada Gambar 4–10 dan meninjau keseimbangan dalam arah vertikal terlihat bahwa gaya yang timbul pada batang *DG* harus sama dan berlawana _arah dengan beban yang bekerja. Dengan demikian, batang *DG* memikul gaya tarik sebesar 2*P*.

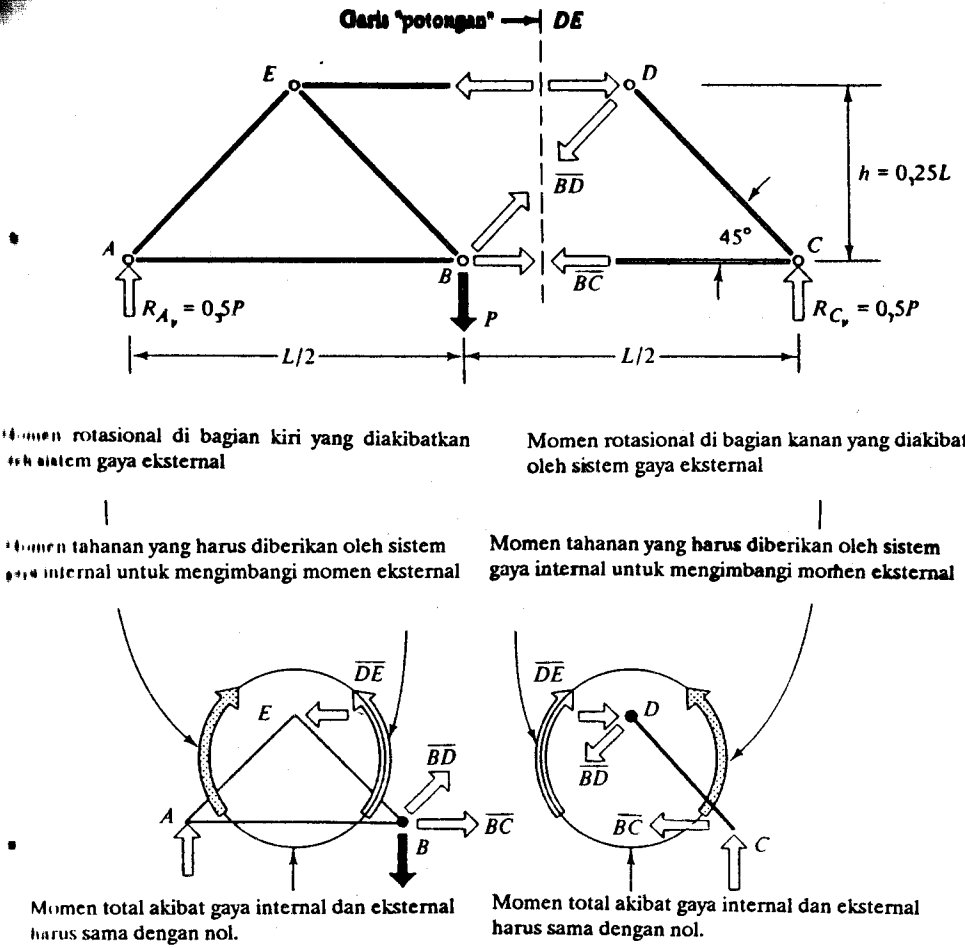
Contoh lain mengenai kondisi penyederhanaan terlihat pada rangka batang pada Gambar 4–9 yang telah kita analisis sebelum ini. Dengan memperhatikan titik kumpul *B*, terlihat bahwa *BH* adalah batang nol. Hal ini berarti pula bahwa batang *BC* adalah batang nol. Hal ini akan lebih mudah terlihat dengan menggunakan sistem sumbu yang diputar seperti terlihat pada Gambar 4–9, dan meninjau keseimbangan dalam arah *m*. Batang *BC* tidak dapat mempunyai gaya apa pun agar pada titik kumpul *H* terjadi keseimbangan. Dengan memperhatikan titik kumpul *I* terlihat bahwa *DF* harus memikul gaya tarik sebesar *P*. Hal ini berarti pula bahwa batang *FC* memikul gaya tekan *P*. Sekali lagi, akan lebih mudah apabila kita menggunakan sistem sumbu terputar seperti terlihat pada Gambar 4–9. Karena *DF* terlihat mengalami tarik sebesar *P*, maka komponen gaya tersebut dalam arah *m*, harus diimbangi oleh komponen yang sama dari batang *FC*. Batang-batang tersebut membentuk sudut sama terhadap sumbu *m'*, karena itu gaya-gayanya secara numerik sama, jadi *FC* = *P*.

Kondisi yang menjadikan sederhana seperti yang dibahas pada paragraf sebelum ini tentu saja sangat memudahkan. Teknik demikian sangat berguna untuk memperoleh pengertian distribusi gaya yang ada di dalam rangka batang.

4.3.4 Keseimbangan Potongan

Pada pembahasan kita mengenai keseimbangan titik, bagian dari rangka batang yang kita tinjau keseimbangannya adalah titik hubung itu sendiri. prinsip yang mendasari teknik analisis yang dibahas di sini adalah bahwa *setiap* bagian dari suatu struktur harus berada dalam keseimbangan. Dengan demikian, bagian yang dapat ditinjau dapat pula mencakup banyak titik kumpul dan batang. Peninjauan keseimbangan bagian tersebut dapat digunakan untuk memperoleh besar gaya batang. Konsep peninjauan keseimbangan bagian dari suatu struktur yang bukan hanya satu titik hubung merupakan cara yang sangat berguna dan merupakan dasar untuk analisis dan desain rangka batang, juga banyak struktur lainnya.

Bagaimana gaya batang dapat diperoleh dengan menggunakan pendekatan tersebut akan dijelaskan dengan menggunakan contoh. Perhatikan kembali rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–8. Asumsikan bahwa kita mencari gaya-gaya batang *ED, BD,* dan *BC*. Mula-mula rangka batang tersebut dipandang terdiri atas dua bagian. Diagram benda bebas untuk bagian-bagian ini diperlihatkan pada Gambar 4–11. Kumpulan gaya-gaya internal yang terlihat pada gambar tersebut merupakan akibat dari beban luar pada seluruh struktur, dan juga merupakan gaya-gaya yang mempertahankan keseimbangan bagian rangka batang yang kita tinjau itu. Keseimbangan translasional maupun rotasional harus ditinjau karena gaya-gaya yang ada padanya bersifat koplanar, tidak merupakan gaya-gaya yang konkuren maupun sistem gaya sejajar (lihat Bab 2.3).



GAMBAR 4–11 Diagram benda bebas untuk mencari gaya batang *ED, BD,* dan *BC* dengan cara potongan.

Sebelum mencari gaya-gaya batang pada contoh ini, kita coba selidiki dulu sepintas, bagaimana sifat gaya batang tersebut, apakah tarik ataukah tekan. Sebagai contoh, perhatikan persyaratan keseimbangan bagian yang terlihat pada Gambar 4–11 kiri. Jelaslah bahwa gaya batang *BD* harus berarah ke atas agar mempunyai komponen vertikal yang cukup untuk mengimbangi perbedaan yang ada di antara reaksi 0,5*P* dan gaya *P* ke bawah yang bekerja pada bagian tersebut. Dengan demikian, batang itu harus bersifat tarik. Karena bagian sebelah kiri dari rangka batang itu harus berada dalam keseimbangan juga, maka momen yang diakibatkan oleh gaya internal (lihat Gambar 4–11). dengan menjumlahkan momen-momen tersebut terhadap titik *B*, terlihat bahwa sifat gaya batang *DE* harus berarah seperti pada gambar tersebut agar keseimbangan momen terhadap titik *B* terpenuhi. Ingat

bahwa jumlah momen yang diakibatkan oleh *semua* gaya harus sama dengan nol terhadap *sembarang* titik. Dengan demikian, batang *DE* harus merupakan batang tekan. Gaya-gaya yang terlihat pada bagian kiri sama dan berlawanan arah dengan yang ada pada bagian kanan. Karena bagian kanan juga harus memenuhi keseimbangan translasional dan rotasional, maka sifat gaya batang *BC* dapat diperoleh dengan menjumlahkan momen terhadap titik *D*. Agar keseimbangan momen terhadap titik itu terpenuhi, maka gaya *BC* harus mempunyai arah seperti tergambar, yaitu berupa gayatarik. Dengan demikian, keadaan tegangan pada setiap batang dapat ditentukan secara kualitatif. Proses matematis untuk menentukan besar numerik gaya-gaya batang secara konseptual sama dengan yang telah disebutkan di atas.

CONTOH

Tentukan gaya pada batang *DE, BD,* dan *BC* pada rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–8 dan 4–11.

Solusi:

BAGIAN KIRI

Keseimbangan translasional dalam arah vertikal: $\Sigma F_y = 0 + \uparrow$:

$+0{,}5P$	$-P$	$+ \overline{BD} \sin 45^\circ = 0$
reaksi R_{Ay} dalam arah vertikal	beban eksternal	komponen vertikal gaya batang *BD*. Gaya batang diasumsikan tarik

$$\overline{BD} = 0{,}707\,P \text{ (tarik)}$$

Dengan demikian, gaya batang *BD* adalah tarik karena diperoleh bertanda positif sesuai dengan pemisalan. Selanjutnya, apabila kita menuliskan $\Sigma F_x = 0$, akan ada dua gaya yang tidak diketahui, yaitu *ED* dan *BC* sehingga persamaan tersebut tidak dapat dipecahkan secara langsung. Dengan demikian, kita coba menuliskan persamaan keseimbangan momen terhadap titik yang hanya melibatkan satu gaya tak diketahui. Dengan memilih titik *B*, berarti hanya gaya batang *BC* yang muncul dalam persamaan momen tersebut.

Keseimbangan momen terhadap titik B: $\Sigma M_B = 0 +$:

$-(0{,}5P$	x	$0{,}5L)$	+	$(\overline{ED}$	x	$h)$	=	0
reaksi R_A		lengan momen		gaya batang		lengan momen		

atau

$$-0{,}2PL + \overline{ED}(0{,}25L) = 0$$

$$0{,}25PL = \overline{ED}\,(0{,}25L)$$

(Momen akibat beban eksternal sama dengan momen penahan yang ditimbulkan oleh gaya internal.)
Dengan demikian:

$$\overline{ED} = + P \text{ (tekan)}$$

Jadi, gaya batang tersebut adalah tekan, seperti yang diasumsikan. Langkah pembuktian di mana momen yang timbul akibat gaya internal sama dengan yang diakibatkan oleh gaya luar sebenarnya tidak perlu dilakukan. Akan tetapi hal ini merupakan cara penting dalam melihat bagimana perilaku struktural bagian tersebut. Cara meninjau struktur akan dibahas pada Bab 4.3.8. Selanjutnya, karena dua gaya batang yang ada pada bagian tersebut telah diketahui, maka satu-satunya yang belum diketahui dapat diperoleh langsung dengan menerapkan persamaan keseimbangan yang belum digunakan, yaitu $\Sigma F_x = 0$.

Keseimbangan translasional dalam arah horizontal: $\Sigma F_x = 0 + \rightarrow$:

$$-\overline{ED} + \overline{BD}\cos 45^\circ + \overline{BC} = 0$$

atau

$$-P + (0{,}707P)\cos 45^\circ + \overline{BC} = 0$$

$$\overline{BC} = 0{,}5P \text{ (tarik)}$$

Dengan demikian, gaya batang *BC* adalah tarik, seperti yang dimisalkan. Semua gaya batang yang ada pada bagian kiri sekarang telah diperoleh. Gaya pada bagian kiri ini sama besar dan berlawanan arah dengan di bagian kanan. Kita akan mengecek keseimbangan bagian kanan dengan menggunakan gaya-gaya yang telah diperoleh.

BAGIAN KANAN

Keseimbangan momen terhadap titik D: $\sum M_D = 0$ ↻:

$$-(\overline{BC} \times 0{,}25L) + (0{,}5P \times 0{,}25L) = 0$$

atua

$$-(0{,}5P \times 0{,}25L) + (0{,}5P \times 0{,}25L) = 0 \quad \text{Cocok!}$$

Keseimbangan translasional dalam arah vertikal: $\sum F_y = 0 +\uparrow$:

$$-\overline{BD}\sin 45° + 0{,}5P = 0$$

atau

$$-0.707P \sin 45° + 0{,}5P = 0 \qquad \text{Cocok!}$$

Keseimbangan translasional dalam arah horizontal: $\sum F_x = 0 \ \overrightarrow{+}$:

$$-\overline{BC} - \overline{BD}\cos 45° + \overline{ED} = 0$$

atau

$$-0{,}5P - 0{,}707P \sin 45° = 0 \qquad \text{Cocok!}$$

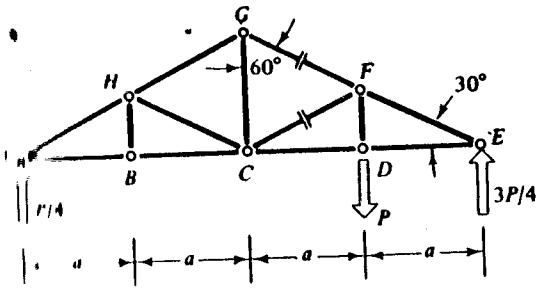
Jadi, terbukti bahwa bagian kanan juga memenuhi persamaan keseimbangan translasional maupun rotasional,

Perhitungan yang dilakukan pada contoh di atas dapat digunakan untuk mencari gaya batang pada rangka batang bidang apabila paling banyak ada tiga gaya yang belum diketahui karena hanya ada tiga persamaan keseimbangan statika yang independen untuk benda tegar. Kita harus mengusahakan agar potongan yang dibuat tidak melibatkan lebih dari tiga gaya yang belum diketahui. Dekomposisi seperti terlihat pada Gambar 4–8(d), misalnya, dapat saja dilakukan, tetapi karena ada lebih dari tiga gaya yang belum diketahui, maka persamaan keseimbangan translasional serta rotasional (persamaan keseimbangan statika) saja tidak cukup untuk mencari gaya-gaya tersebut.

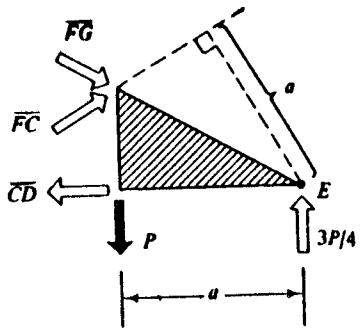
Metode yang dibahas di atas sering disebut *metode potongan* di mana pada metode tersebut kita meninjau bagian dari rangka batang secara terpisah dari bagian lainnya. Pada metode ini ada garis khayal yang memotong rangka batang menjadi dua bagian. Garis khayal ini tidak selalu harus lurus. Metode keseimbangan titik juga dapat dipandang sebagai metode potongan, yang dalam hal ini hanya melibatkan satu titik hubung [lihat Gambar 4–8(b)]. Tidak ada perbedaan nyata antara kedua metode tersebut kecuali dalam peninjauan keseimbangan rotasionalnya. Kedua-duanya dapat digunakan pada analisis suatu rangka batang. Metode keseimbangan titik hubung biasanya digunakan apabila kita ingin mengetahui semua gaya batang, sedangkan metode potongan biasanya digunakan apabila kita ingin mengetahui hanya sejumlah terbatas.

CONTOH

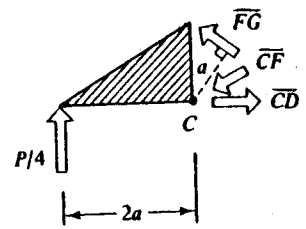
Tentukan gaya-gaya batang *FG* dan *FC* pada rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–12 (sama dengan rangka batang yang telah dianalisis dengan metode keseimbangan titik hubung).



(a) Rangka batang



(b) Potongan untuk mencari *FC*



(c) Potongan untuk mencari *FG*

GAMBAR 4–12 Analisis rangka batang dengan metode potongan.

Solusi:

Untuk menentukan gaya batang *FC*, rangka batang dipotong (secara khayal) seperti terlihat pada Gambar 4–12(b). Titik *E* dipilih sebagai pusat momen karena gaya-gaya *FG* dan *CD* yang belum diketahui melalui titik tersebut sehingga tidak masuk ke dalam persamaan momen (lengan momennya nol).

$$\Sigma M_E = 0:$$

$$-\overline{FC}(a) + P(a) = 0 \quad \text{atau} \quad \overline{FC} = 1{,}0P$$

Untuk mencari gaya batang *FG*, kita potong struktur tersebut seperti terlihat pada Gambar 4–12(c) dan kita gunakan titik *C* sebagai pusat momen.

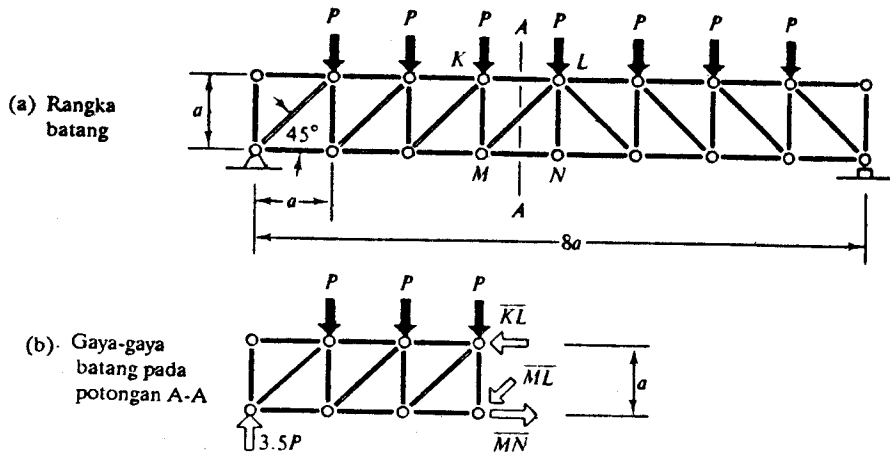
$$\Sigma M_C = 0:$$

$$+\overline{FG}(a) - \left(\frac{P}{4}\right)(2a) = 0 \quad \text{atau} \quad FG = 0{,}5P$$

Terlihat bahwa hasil-hasil ini sama dengan yang telah diperoleh terdahulu dengan metode keseimbangan titik hubung, tetapi dengan metode potongan, kita dapat mencari gaya-gaya batang di atas secara lebih cepat.

CONTOH

Tentukan gaya-gaya batang *MN, ML, dan KL* pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–13(a).



GAMBAR 4–13 Solusi gaya batang dengan metode potongan.

Solusi:

Rangka batang dipotong oleh garis pemotong yang melalui ketiga batang tersebut.

BAGIAN KIRI

$$\sum F_y = 0 \quad +\uparrow:$$

$$+3{,}5P - P - P - P - \overline{ML}\sin 45° = 0$$

Jadi,

$$\overline{ML} = 0{,}707P \qquad \text{(tekan)}$$

$$\sum M_m = 0 \quad \circlearrowleft:$$

$$-(3{,}5P \times 3a) + P(2a) + (Pa) + \overline{KL}(a) = 0$$

Jadi,

$$\overline{KL} = 7{,}5P \qquad \text{(tekan)}$$

$$\sum F_x = 0 \quad +\rightarrow:$$

$$-\overline{KL} + \overline{MN} - \overline{ML}\cos 45° = 0$$

atau

$$-7{,}5P + \overline{MN} - 0.707P\cos 45° = 0$$

sehingga:

$$\overline{MN} = 8{,}0P \qquad \text{(tarik)}$$

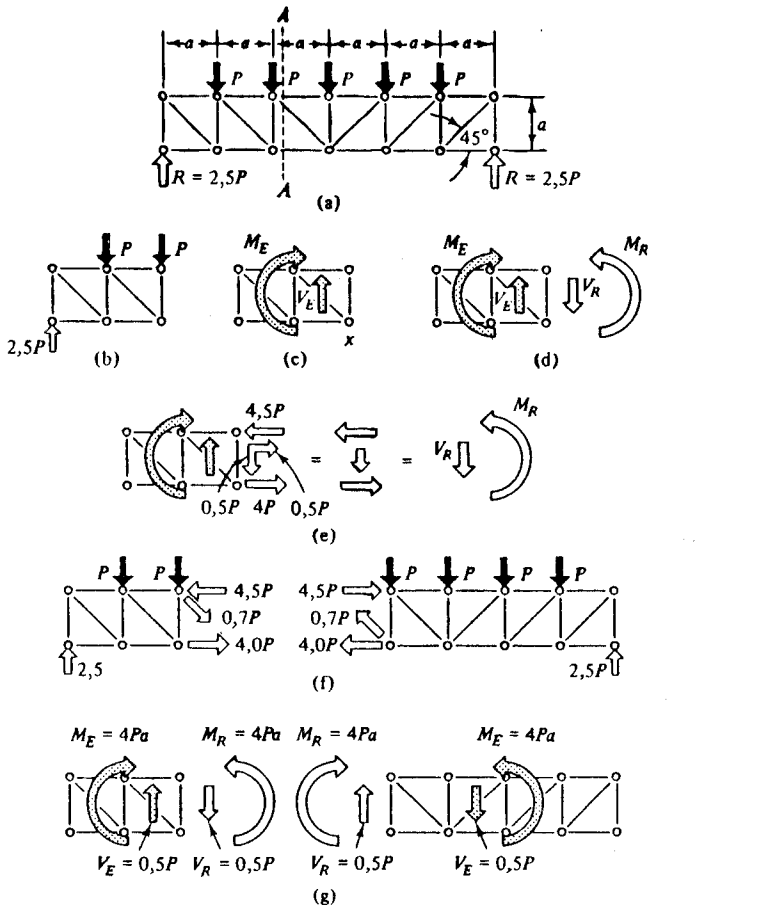
Apabila kita mencari gaya batang pada contoh terakhir, akan terlihat jelas prosesnya jauh lebih panjang dibandingkan dengan metode potongan karena setiap titik hubung harus ditinjau satu per satu mulai dari salah satu tumpuannya. Ketiga gaya batang itu tentu saja bergantung pada dimensi dan geometri menyeluruh rangka batang serta kondisi pembebanan, juga pada geometri lokal ketiga batang tersebut. Dengan demikian, gaya pada batang tepi atas (batang *KL*) berhubungan langsung dengan tinggi rangka batang. Apabila tingginya menjadi dua kali, maka gaya batang menjadi setengahnya, begitu pula sebaliknya. Gaya pada batang diagonal juga berhubungan langsung dengan tinggi rangka batang. Apabila rangka batang semakin tinggi, maka gaya batang diagonal semakin kecil sebagai akibat semakin besarnya sinus sudut batang diagonal. Gaya pada batang tepi bawah akan berkurang apabila rangka batang semakin tinggi. Perlu diperhatikan bahwa gaya-gaya tersebut peka terhadap geometri lokal pada potongan yang ditinjau, dan *tidak bergantung* pada aspek fisik lain pada rangka batang. Apabila kita hanya memperhatikan tiga batang tersebut, gayanya tidak akan berubah apabila orientasi batang diagonal lainnya kita ubah. Ini berarti bahwa geometri rangka batang lainnya boleh berubah asalkan geometri lokal tiga batang tersebut tetap, maka ketiga gayanya tidak akan berubah. Hal yang menentukan adalah keseimbangan *free body* yang ditinjau. Susunan internal batang-batang yang membentuk suatu benda tegar di bagian lain dari potongan tidak mempengaruhi gaya pada batang-batang pada potongan yang diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan.

Diskusi di atas mengilustrasikan kegunaan metode potongan. Observasi mengenai paragraf di atas dapat saja dilakukan dengan menggunakan metode keseimbangan titik hubung, tetapi hal ini tidak dapat dilakukan secara ringkas.

4.3.5 Geser dan Momen pada Rangka Batang

Di sini akan dibahas cara khusus meninjau bagaimana rangka batang memikul beban, cara yang merupakan salah satu faktor penting dalam mendesain rangka batang. Cara meninjau yang dimaksud di sini melibatkan gaya dan momen eksternal serta gaya dan momen tahanan internal pada rangka batang.

Perhatikan rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–14 beserta bagian struktur sebelah kiri potongan *A–A*. Perhatikan bahwa diagram pada Gambar 4–14(b) *bukan* merupakan diagram keseimbangan karena hanya gaya-gaya *eksternal* yang terdiri atas beban luar dan reaksi yang diperlihatkan. Dengan mempelajari diagram tersebut, terlihat bahwa efek total dari sekumpulan gaya yang tergambar menghasilkan *gaya berarah ke atas sebesar* 0,5*P* [lihat Gambar 4–14(c)]. Gaya total ini dapat dipandang sebagai *gaya geser eksternal* (V_E). Dengan mempelajari efek



(a) Rangka batang

(b) Sistem gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri

(c) Momen lentur eksternal dan gaya geser eksternal yang ekuivalen dengan sistem gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri.

$\Sigma F_y : -P - P + 2,5P = 0,5P$
(Gaya geser eksternal) (V_E)

$\Sigma M_x : +2a(2,5P) - a(P) = 4Pa$
(Momen eksternal) (M_E)

(d) Diagram keseimbangan untuk bagian kiri: gaya geser internal (V_R) dan momen tahanan internal (M_R) timbul pada struktur untuk menjamin keseimbangan.

(e) Gaya geser tahanan internal (V_R) dan momen tahanan internal (M_R) timbul melalui aksi gaya-gaya pada batang.

(f) Diagram keseimbangan pada bagian kiri dan kanan yang dinyatakan dalam sistem gaya internal dan eksternal

(g) Diagram keseimbangan bagian kiri dan kanan yang dinyatakan dalam momen dan geser eksternal dan internal ekuivalen. Jumlah momen dan gaya geser yang bekerja pada setiap bagian harus nol.

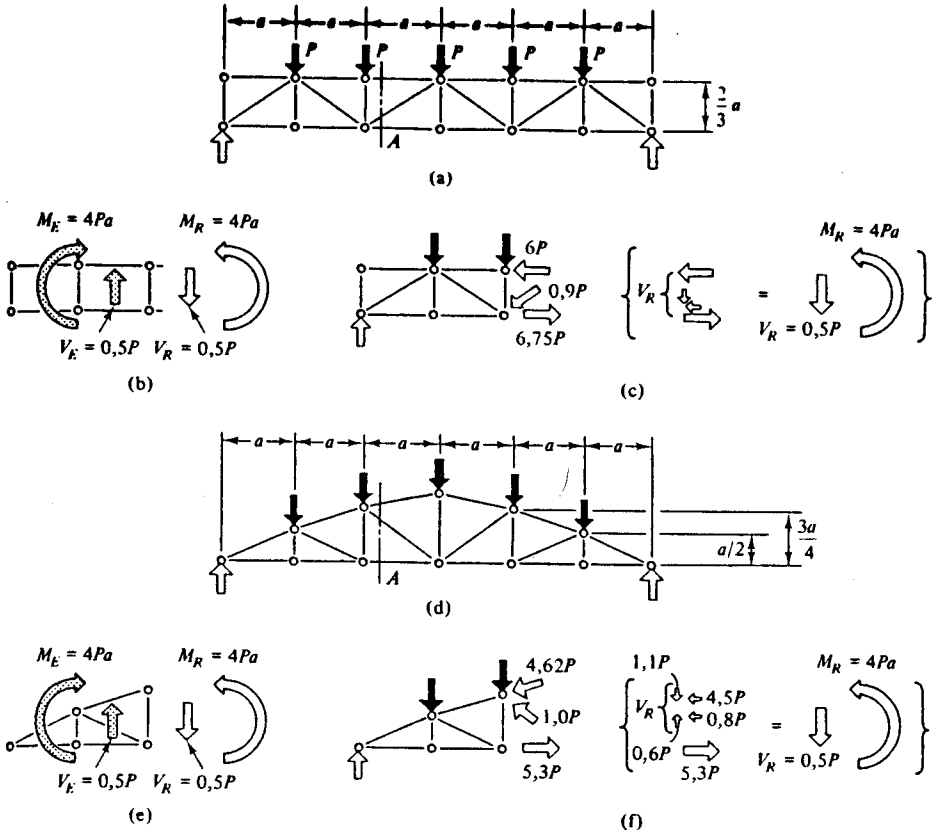
GAMBAR 4–14 Geser dan momen pada rangka batang. Diagram ini mengilustrasikan timbulnya gaya geser dan momen di potongan rangka batang yang berasal dari sistem beban luar yang bekerja pada rangka batang. Momen dan geser tahanan timbul pada potongan yang sama, yang merupakan aksi dari gaya internal yang timbul di batang-batang pada potongan.

rotasional terhadap A–A, jelas bahwa kumpulan gaya tersebut mempunyai efek total momen rotasional sebesar $4Pa$ [lihat Gambar 4–14(c)[. Momen total ini sering disebut sebagai *momen lentur eksternal* (M_E) yang ada pada potongan. Sebutan "lentur" ini adalah karena kecenderungan total momen eksternal menyebabkan terjadinya lenturan pada keseluruhan rangka batang (bukan pada setiap batang).

Fungsi adanya gaya-gaya pada batang sekarang dapat dinyatakan dalam gaya geser eksternal dan momen lentur eksternal pada potongan. Agar keseimbangan vertikal potongan struktur dapat dijamin, gaya geser eksternal harus diimbangi oleh gaya geser tahanan total yang besarnya sama tetapi berlawanan arah dengan gaya geser eksternal. Gaya tahanan total ini disebut *gaya geser tahanan internal* (V_R) [lihat Gambar 4–14(d)]. Dengan cara yang sama, efek rotasional total dari gaya internal tersebut harus memberikan *momen tahanan internal* (M_R) *yang besarnya* sama dan berlawanan arah dengan momen lentur eksternal pada potongan tersebut. Dengan demikian, momen rotasional total adalah nol, seperti memang seharusnya berdasarkan syarat keseimbangan [lihat Gambar 4–14(d)]. Jadi, $M_E = M_R$ atau $M_E - M_R = 0$.

Pada contoh struktur yang diperlihatkan pada Gambar 4–14, batang-batang tepi atas dan bawah tidak dapat memberikan kontribusi dalam keseimbangan arah vertikal (tidak memberikan gaya geser tahanan internal) karena arah batang-batang tersebut vertikal. Dengan demikian, seluruh gaya geser tahanan internal harus diberikan oleh komponen vertikal gaya pada batang-batang diagonal. Cara meninjau struktur seperti ini dapat juga digunakan dalam menghitung gaya batang maupun dalam mengecek gaya-gaya yang telah diperoleh dengan metode lain. Sehubungan dengan keseimbangan momen, harus ada kopel (⟸⟹) yang ditimbulkan oleh kumpulan gaya internal untuk mengimbangi momen lentur akibat beban eksternal. Seperti terlihat pada Gambar 4–14(e), gaya horizontal pada batang-batang tepi dan komponen horizontal dari gaya batang diagonal memberikan kopel yang mengimbangi momen lentur tersebut.

Semua uraian di atas didasarkan atas konsep-konsep yang telah dibahas pada Bab 4.3.4. Peninjauan struktur dengan cara demikian akan memudahkan kita melihat bahwa fungsi struktural dasar konfigurasi batang pada rangka batang adalah untuk memberikan tahanan terhadap geser dan momen eksternal yang ada. Momen dan geser eksternal ini hanya bergantung pada lokasi dan besar beban eksternal, tidak bergantung pada karakteristik rangka batang itu sendiri. Tinjaulah dua struktur lain pada Gambar 4–15 yang gaya eksternalnya sama, tetapi pola batangnya berbeda dengan struktur sebelumnya. Gaya-gaya batang yang diperlihatkan pada gambar tersebut diperoleh dengan metode potongan (analisisnya tidak diperlihatkan di sini). Pada kedua kasus, gaya yang timbul pada setiap batang harus menghasilkan (pada potongan yang diperlihatkan dalam gambar) gaya geser tahanan internal $0,5P$ dan momen tahanan internal $4Pa$. Tentulah *resultan* gaya-gaya ini identik dengan yang telah kita peroleh pada struktur yang telah kita bahas di atas.



(a) Rangka batang yang memikul kondisi beban yang sama dengan yang ada pada Gambar 4-14

(b) Gaya geser dan momen lentur eksternal yang ekuivalen dengan sistem gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri

$\Sigma F_y : -P - P + 2{,}5P = 0{,}5P$ (Gaya geser eksternal) (V_E)

$\Sigma M_x : +2a(2{,}5P) - a(P) = 4Pa$ (Momen eksternal) (M_E)

(c) Diagram keseimbangan untuk bagian kiri: gaya geser internal (Vo) dan momen tahanan internal (Mo) timbul dalam struktur untuk mengimbangi V_E dan M_E.

(d) Rangka batang yang memikul kondisi beban yang sama dengan yang ada pada Gambar 4-14

(e) Gaya geser dan momen lentur eksternal yang ekuivalen dengan sistem gaya eksternal yang bekerja pada bagian kiri

$\Sigma F_y : -P - P + 2{,}5P = 0{,}5P$ (Gaya geser eksternal) (V_E)

$\Sigma M_x : +2a(2{,}5P) - a(P) = 4Pa$ (Momen eksternal)

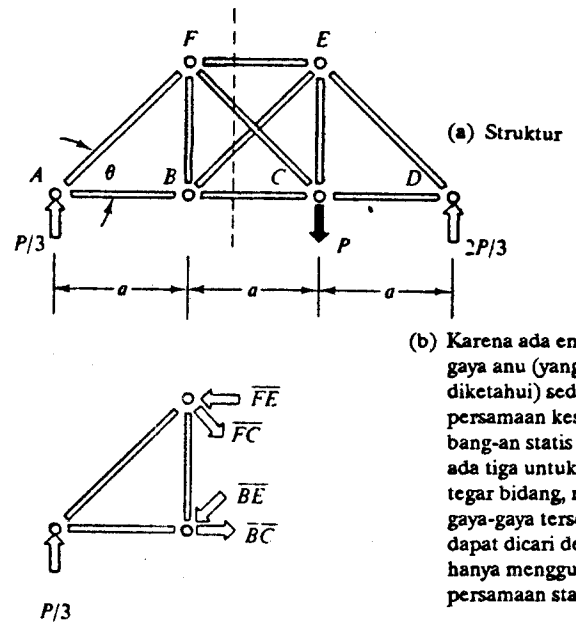
(f) Diagram keseimbangan untuk bagian kiri: gaya geser internal (Vo) dan momen tahanan internal (M_E)timbul dalam struktur untuk mengimbangi V_E dan M_E.

GAMBAR 4–15 Momen dan geser pada rangka batang: kedua rangka batang memikul kondisi pembebanan yang sama dengan yang ada pada Gambar 4–14. Momen dan geser eksternal, serta momen dan geser tahanan internal yang ada pada potongan, sama untuk ketiga struktur. Akan tetapi gaya masing-masing batang internal (yang resultannya memberikan gaya geser dan momen internal) berbeda karena geometri batangnya berbeda. Efek total sistem gaya batang tersebut sama, yaitu memberikan geser dan momen tahanan internal yang mengimbangi geser dan momen eksternal pada potongan.

Pembahasan di atas menunjukkan adanya konsep *keserupaan* antarstruktur. Berbagai struktur secara eksak dapat mempunyai respons yang sama terhadap beban yang sama, tetapi semuanya *harus* memberikan gaya geser dan momen tahanan internal yang sama. Cara memandang perilaku rangka batang ini juga merupakan hal penting dalam desain. Kita harus menentukan konfigurasi struktur yang paling efisien yang dapat memberikan momen dan geser tahanan internal untuk mengimbangi momen lentur dan gaya geser eksternal. Prinsip ini dapat diterapkan secara umum, tidak hanya pada rangka batang.

4.3.6 Rangka Batang Statis Tak Tentu

Pada semua rangka batang yang telah dibahas di atas kita dapat menghitung gaya batang dengan menerapkan persamaan keseimbangan statika. Rangka batang demikian sering disebut sebagai rangka batang *statis tertentu.* Ada jenis rangka barang lain yang tidak dapat dipecahkan hanya dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika, yaitu yang kelebihan banyaknya tumpuan atau banyaknya batang. Perhatikan rangka batang bidang yang terlihat pada Gambar 4–16. Dengan hanya menggunakan persamaan keseimbangan statika, kita tidak dapat menghitung gaya pada batang-batang yang terletak di tengah karena ada empat anu (yang belum



GAMBAR 4–16 Rangka batang statis tak tentu dalam. Gaya-gaya batangnya tergantung pada sifat fisik batang-batangnya.

diketahui), sedangkan persamaan keseimbangan statika hanya ada tiga. Kesulitan perhitungan ini terlihat nyata apabila kita menuliskan keseimbangan gaya pada arah vertikal:

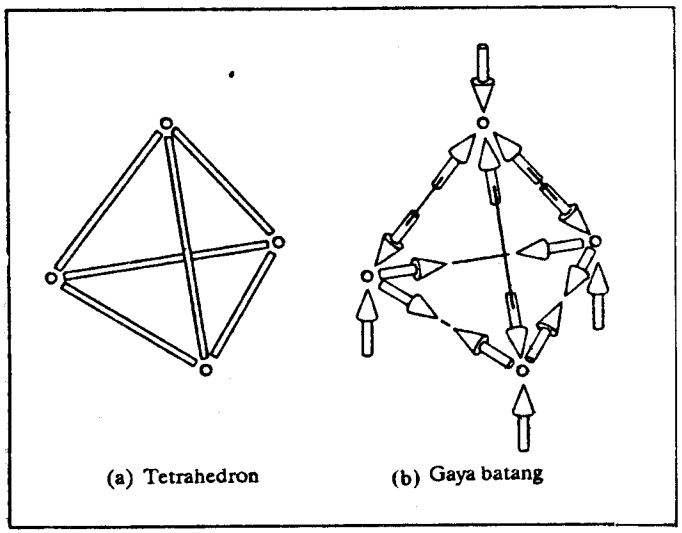
$$\sum F_y = 0 +\uparrow:$$

$$+\tfrac{1}{3}P - \overline{BE}\sin\theta - \overline{FC}\sin\theta = 0$$

atau

$$\overline{BE}\sin\theta + \overline{FC}\sin\theta = \frac{P}{3}$$

Jelaslah bahwa persamaan ini tidak dapat dipecahkan. Dengan menerapkan persamaan keseimbangan lain pada diagram benda bebas ini, yaitu $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma M_0 = 0$, kita masih belum dapat memecahkannya, baik secara sendiri-sendiri maupun secara simultan. Jenis struktur seperti ini disebut *statis tak tentu dalam.* Perlu ditekankan bahwa prinsip-prinsip statika yang dibahas di sini juga berlaku pada jenis-jenis struktur lain. Pada struktur statis tak tentu keseimbangan translasional dan rotasional ($\Sigma F_x = 0$, ΣF_y, dan $\Sigma M_0 = 0$) juga masih berlaku, tetapi persamaan-persamaan tersebut belum cukup untuk digunakan dalam mencari gaya batang. Pada buku ini topik struktur statis tak tentu tidak dibahas. Sekalipun demikian, kita perlu memahami benar arti struktur yang bersifat statis tertentu, yaitu struktur yang gaya-gaya dalamnya bergantung pada sifat-sifat fisik elemen strukturnya.



GAMBAR 4–17 Konfigurasi batang secara tiga dimensi

4.3.7 Rangka Batang Ruang

Kestabilan yang ada pada pola batang segitiga dapat diperluas ke dalam tiga dimensi. Pada rangka batang bidang, bentuk segitiga sederhana merupakan dasar, sedangkan bentuk dasar pada rangka batang ruang adlah tetrahedron, seperti terlihat pada Gambar 4–17.

Prinsip-prinsip yang telah dibahas dalam analisis rangka batang bidang secara umum dapat diterapkan pada rangka batang ruang. Sekali lagi, kestabilan merupakan tinjauan utama. Adanya pola yang tidak segitiga merupakan petunjuk bahwa setiap titik hubung harus diselidiki, apakah dapat mempertahankan hubungan geometris yang tetap dengan titik hubung lainnya apabila beban bekerja pada titik sembarang pada struktur.

Gaya-gaya yang timbul pada batang suatu rangka batang ruang dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan ruang potongan rangka batang ruang terebut. Jelas bahwa persamaan statika yang digunakan harus merupakan *bentuk lengkap* dari persamaan yang telah dibahas pada Bab 2.3, yaitu untuk benda tegar tiga dimensi. Persamaan yang dimaksud adalah:

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad \text{dan} \quad \sum M_x = 0, \quad \sum M_y = 0, \quad \sum M_z = 0$$

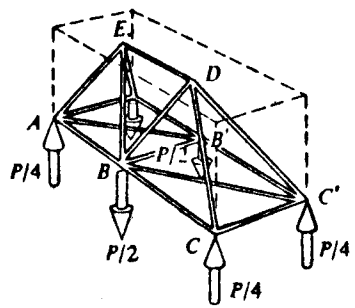
Apabila diterapkan secara langsung pada rangka batang ruang yang cukup besar, persamaan-persamaan ini akan melibatkan banyak titik hubung dan batang. Oleh karena itu, tidak dibahas lebih lanjut pada buku ini. Pada Gambar 4–18 diperlihatkan hasil analisis untuk konfigurasi sederhana, bukan rangka batang ruang yang besar. Biasanya diperlukan formulasi komputer untuk menganalisis konfigurasi yang lebih kompleks.

4.4 Desain Rangka Batang

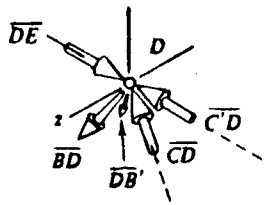
4.4.1 Latar Belakang

Sebagaimana terlihat pada contoh-contoh yang telah dibahas sebelum ini, rangka batang dapat mempunyai banyak bentuk. Untuk setiap bentuk, perhitungan gaya batangnya pada umumnya dapat dilakukan secara langsung. Apabila gaya-gaya tersebut telah diperoleh, maka ukuran fisik rangka batang itu dapat ditentukan atau dirancang terhadap gaya-gaya tersebut. Ini merupakan langkah yang sangat penting dalam mendesain rangka batang yang dipakai pada gedung, dan akan dibahas lebih rinci berikut ini. Seperti halnya pada balok maupun kabel, penentuan awal mengenai bentang, konfigurasi batang, dan dimensi keseluruhan harus dilakukan sebelum proses analisis gaya batang dan penentuan ukuran setiap elemen struktur pada suatu bangunan dilakukan.

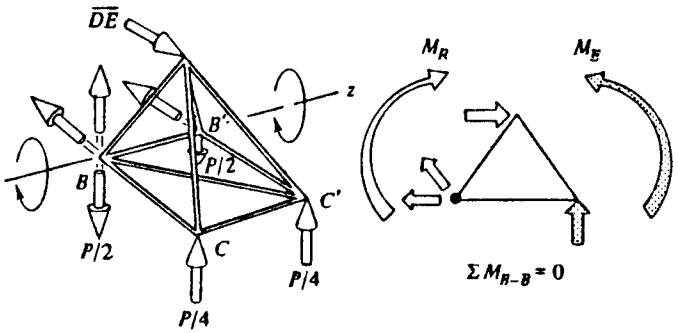
Bagian ini dimulai dengan pembahasan mengenai apa saja yang terlibat dalam merancang rangka batang apabila memang keputusan penggunaan rangka batang telah ditentukan. Pertanyaan yang sering muncul ialah apakah bentuk rangka batang



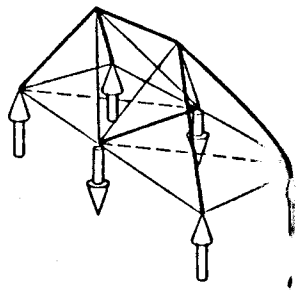
(a) Konfigurasi tiga dimensi khas



(b) Setiap titik kumpul harus berada dalam keadaan keseimbangan rotasional dan translasional. Jadi haruslah: $F_x = 0, F_z = 0$



(c) Setiap segmen yang lebih-besar juga harus berada dalam keseimbangan translasional dan rotansional. Terhadap keseimbangan momen, misalnya, momen eksternal (M_E)yang ada potongan harus seimbang dengan momen tahanan internal (M_R) yang ditimbulkan oleh gaya-gaya batang.



Tarik
Tekan
Nol

(d) Distribusi gaya pada rangka batang

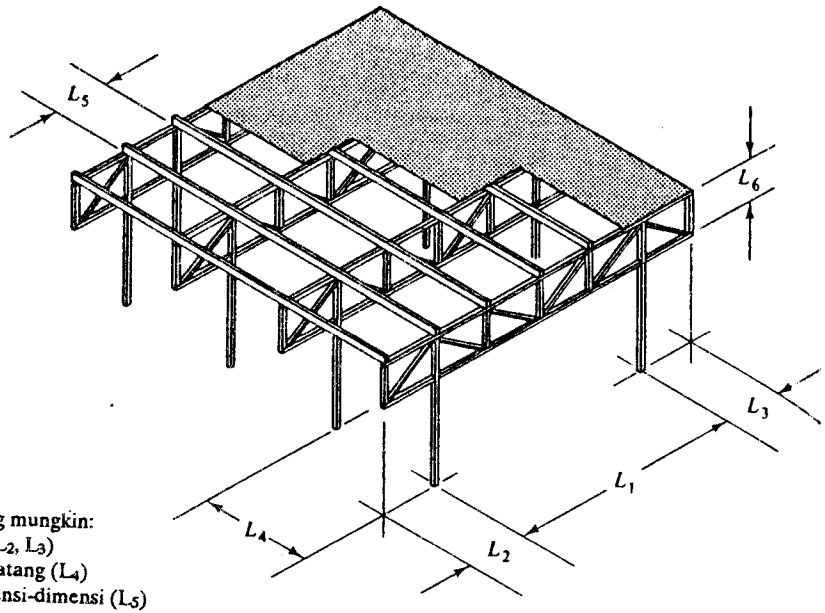
GAMBAR 4–18 Konfigurasi batang tiga dimensional.

yang akan dipakai sesuai dengan gedung yang dirancang. Ini akan dibahas pada Bagian III buku ini. Pembahasan berikut ini terpusat pada desain rangka batang yang disederhanakan, yang diperlukan untuk penggambaran prinsip-prinsip desain. Pada kenyataannya, desain rangka batang lebih kompleks daripada yang dibahas di sini. Pada sistem struktural yang terlihat pada Gambar 4–19, misalnya, variabel desain, yang ditinjau bukan hanya geometri umum rangka batang dan besaran penampang batang, melainkan juga dimensi fisik lainnya seperti L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, dan L_6. Jelas bahwa jarak antara rangka batang (L_4) mempengaruhi besar beban yang harus dipikul oleh setiap rangka batang. Jarak antara balok melintang (L_5) mempengaruhi distribusi beban pada rangka batang sehigga secara implisit mempengaruhi lokasi titik-titik hubung pada rangka batang. Kita tidak mungkin menentukan secara rasional berapakah jarak tersebut yang paling optimal tanpa meninjau detail sistem struktural lainnya (balok melintang, penutup atap, dan kolom-kolom) dan hubungan di antara sistem struktural bangunan tersebut. Jarak balok melintang yang efisien terhadap dimensi rangka batang dapat saja merupakan jarak yang tidak efisien atau bahkan tidak mungkin dipakai untuk penutup atap. Pada umumnya, keputusan desain untuk elemen struktural tertentu (misalnya rangka batang) hanya dapat dilakukan secara garis besar. Berikut ini dibahas secara sederhana hal-hal yang penting dalam desain.

4.4.2 Desain Batang: Umum

Penentuan penampang batang yang digunakan pada rangka batang merupakan aspek penting dalam desain rangka batang. Hal yang cukup sulit adalah terhadap gaya apakah suatu batang harus dirancang. Sebelum ini telah dibuktikan bahwa sifat dan besar gaya yang ada pada batang bergantung pada kondisi pembebanan tertentu pada keseluruhan rangka batang. Karena itulah kita perlu meninjau segala kemungkinan kondisi pembebanan dan menganalisis gaya-gaya yang ada pada setiap batang untuk setiap kondisi pembebanan. Setiap batang harus mampu memikul gaya maksimum (kritis) yang mungkin terjadi. Dengan demikian dapat saja terjadi setiap batang dirancang terhadap kondisi pembebanan yang berbeda-beda (misalnya batang diagonal dirancang terhadap kondisi beban luar tertentu, sedangkan batang tepi dirancang terhadap kondisi beban lainnya).

Apabila gaya kritis pada suatu batang telah diperoleh, maka masalahnya menjadi penentuan bahan dan ukuran penampang melintang yang sesuai untuk batang yang panjangnya telah tertentu, dan mempunyai titik hubung sendi pada kedua ujungnya serta mengalami gaya tarik atau tekan yang besarnya telah didapat. Biasanya tidak ada kesulitan dalam merancang batang tersebut. Cara desain secara lebih rinci (kuantitatif) dibahas pada Bab 2.4 dan Bab 7. Hal yang penting diketahui adalah bahwa batang yang hanya memikul gaya tarik (sebut saja batang tarik) secara umum dapat dirancang terhadap penampang melintang yang lebih kecil daripada batang yang memikul gaya tekan (sebut saja batang tekan) yang besar gayanya sama. Luas penampang melintang batang tarik bergantung langsung pada besar gaya yang ada dan tegangan izin bahan yang digunakan, tetapi tidak bergantung pada panjang batang. Untuk batang tarik, *luas penampang yang diperlukan = gaya tarik/tegangan*



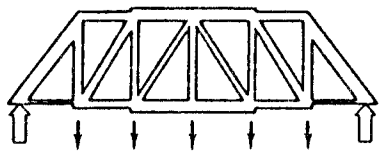
Variabel-variabel yang mungkin:
Lokasi tumpuan (L_1, L_2, L_3)
Jarak antara rangka batang (L_4)
Pola segitiga dan dimensi-dimensi (L_5)
Tinggi maksimum (L_6)
Konfigurasi menyeluruh
Besaran-besaran batang
Jenis tumpuan

GAMBAR 4–19 Variabel desain rangka batang tipikal

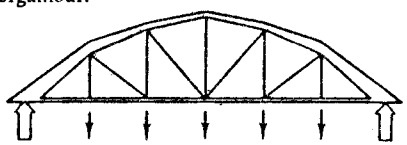
izin. Untuk batang tekan, kita harus memperhitungkan adanya kemungkinan keruntuhan tekuk (buckling) yang dapat terjadi pada batang panjang yang mengalami gaya tekan. Untuk batang tekan yang panjang, kapasitas pikul beban batang tekan berbanding terbalik dengan kuadrat panjang batang. Apabila batang tekan relatif pendek, dan masih di bawah panjang maksimum tertentu, maka tekuk bukan merupakan masalah sehingga luas penampang tekuk bukan merupakan masalah sehingga luas penampang melintang hanya bergantung langsung pada besar gaya yang terlibat dan tegangan izin material, dan jugatidak bergantung pada panjang batang tersebut. Implikasi umum mengenai hal ini adalah batang panjang (yang mempunyai kemungkinan mengalami tekuk) memerlukan luas penampang melintang lebih besar daripada yang diperlukan oleh batang pendek (yang tidak mempunyai kemungkinan tekuk). Apa definisi eksak mengenai batang panjang dan pendek dibahas pada Bab 7.3. Agar material yang dipakai lebih sedikit dalam desain rangka batang, kita lebih menginginkan adanya batang tarik maupun batang tekan pendek daripada batang tekan panjang. Karena itulah desain rangka batang sering kali mempunyai tujuan menciptakan situasi di mana sebanyak mungkin batang yang memikul hanya gaya tarik atau batang tekan pendek. Cara-cara melakukan hal ini kita bahas secara ringkas berikut ini.

Ukuran relatif batang yang dirancang terhadap gaya-gaya yang ada pada dua rangka batang khas diperlihatkan secara skematis dalam Gambar 4–20. Tentu saja ilustrasi ini tidak merepresentasikan keadaan sesungguhnya, tetapi bertujuan untuk memberikan gambaran distribusi material.

Ada cara yang lebih mudah dan lebih sedikit memerlukan biaya daripada penentuan ukuran setiap batang terhadap berbagai kondisi pembebanan. Cara tersebut adalah dengan memakai bagian-bagian kecil sebagai tambahan dari penampang batang tepi atas dan bawah yang konstan. Sebagai contoh, apabila batang tepi atas dirancang sebagai batang yang menerus dan berpenampang melintang konstan, penampang tersebut harus dirancang terhadap gaya maksimum yang ada pada seluruh batang tepi atas. Karena hal ini biasanya hanya terjadi pada satu segmen, maka penampang tersebut akan berlebihan pada segmen lainnya, yang berarti tidak efisien. Agar efisien, penampang konstan yang dipakai kita kombinasikan dengan bagian-bagian kecil sebagai tambahan luas penampang yang hanya dipakai pada segmen yang memerlukannya.



(a) Pada rangka batang yang batang tepinya sejajar, pada umumnya gaya terbesar pada batang tepi adalah di tengah (yaitu di mana terjadi momen terbesar). Gaya terbesar pada batang-batang pengisi (diagonal dan tegak) adalah di pinggir rangka batang (yaitu di mana gaya geser paling besar). Apabila batang didesain berdasarkan gaya batangnya, maka ukuran batangnya juga akan sangat bervariasi seperti tergambar.



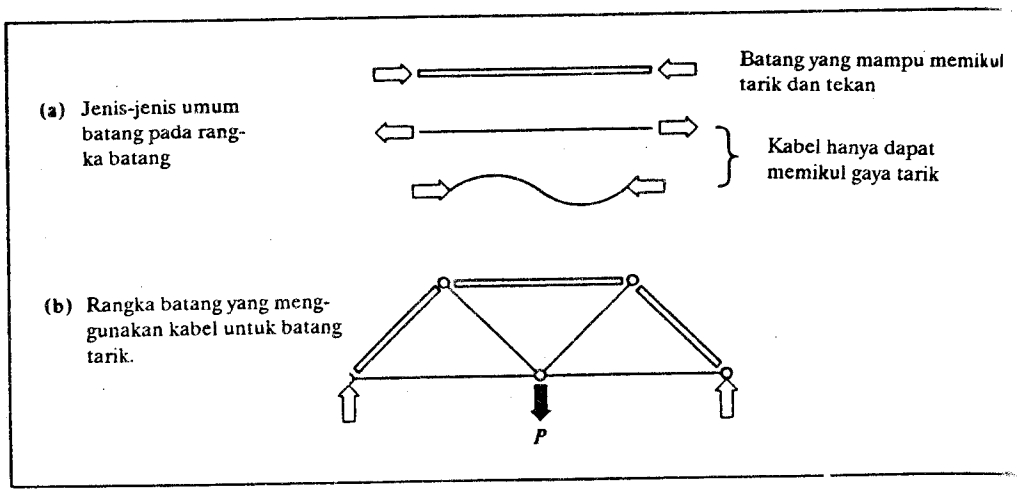
(b) Pada rangka batang yang dirancang khusus ini (tingginya tidak tetap, bergantung pada momen lentur yang ada) gaya batang yang terbesar adalah di dekat ujung struktur karena gaya-gaya yang diakibatkan oleh momen dan gaya geser saling berinteraksi. Gaya pada batang-batang pengisi biasanya sangat kecil. Dengan demikian ukuran batang pada rangka batang ini dapat bervariasi seperti tergambar.

GAMBAR 4–20 Representasi secara diagram penentuan ukuran fisik dua rangka batang tipikal

Sulit untuk menentukan pilihan di antara desain setiap batang terhadap gaya maksimum masing-masing atau desain semua batang terhadap gaya kritis tertentu. Pilihan yang kedua biasanya dilakukan apabila rangka batang yang digunakan cukup banyak dan jarak antaranya tidak besar serta dirancang untuk memikul beban yang relatif ringan. Batang-batang pada rangka batang yang memikul beban mati yang sangat besar pada umumnya didesain terhadap gaya-gaya aktual yang dialami oleh setiap batang.

4.4.3 Penggunaan Batang Tarik Khusus

Pada semua pembahasan rangka batang sebelum ini, kita asumsikan bahwa setiap batangnya mempunyai kemampuan memikul gaya tarik maupun tekan. Meskipun demikian, ada jenis batang lain yang berguna, yaitu yang kita kenal sebagai kabel, yang hanya mampu memikul gaya tarik. Secara fisik, batang jenis demikian merupakan batang baja berpenampang kecil. Batang demikian tidak dapat memikul gaya tekan [Lihat Gambar 4–21(a)], tetapi sering digunakan apabila batang pada rangka batang tersebut diketahui dari analisisnya selalu berada dalam keadaan tarik, dan tidak pernah berubah mengalami gaya tekan. Sebagaimana telah disebutkan, batang yang memikul gaya tarik dapat mempunyai penampang yang lebih kecil daripada yang memikul gaya tekan. Ada jenis batang lain, yaitu yang hanya mampu memikul gaya tekan, tetapi jenis ini sangat jarang digunakan pada rangka batang. Oleh karena itu, tidak dibahas lebih lanjut dalam buku ini. Karena kabel dapat digunakan dan analisisnya menunjukkan adanya batang yang hanya memikul gaya tarik, maka contoh rangka batang pada Bab 4.3.2 dapat menggunakan rangka batang pada Gambar 4–21(b).

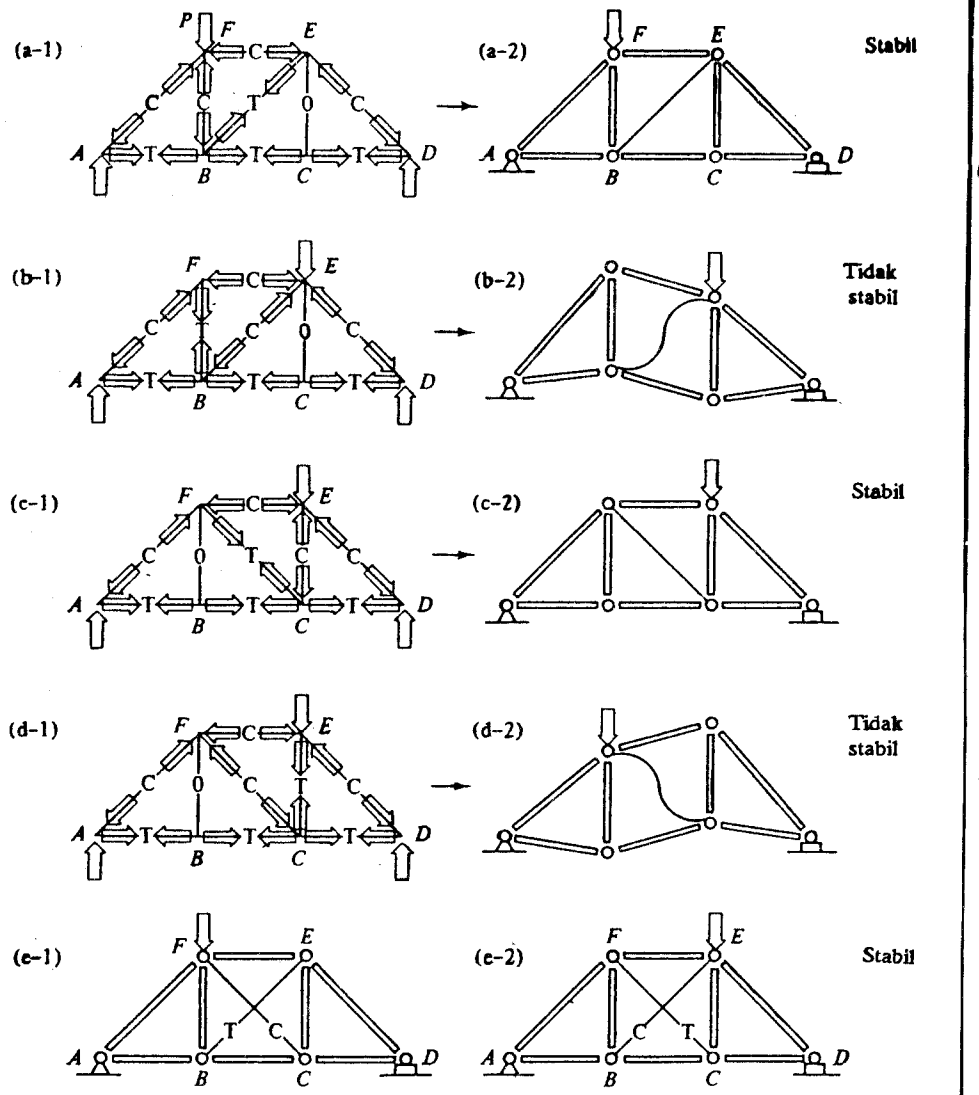


GAMBAR 4–21 Penggunaan "kabel" pada rangka batang

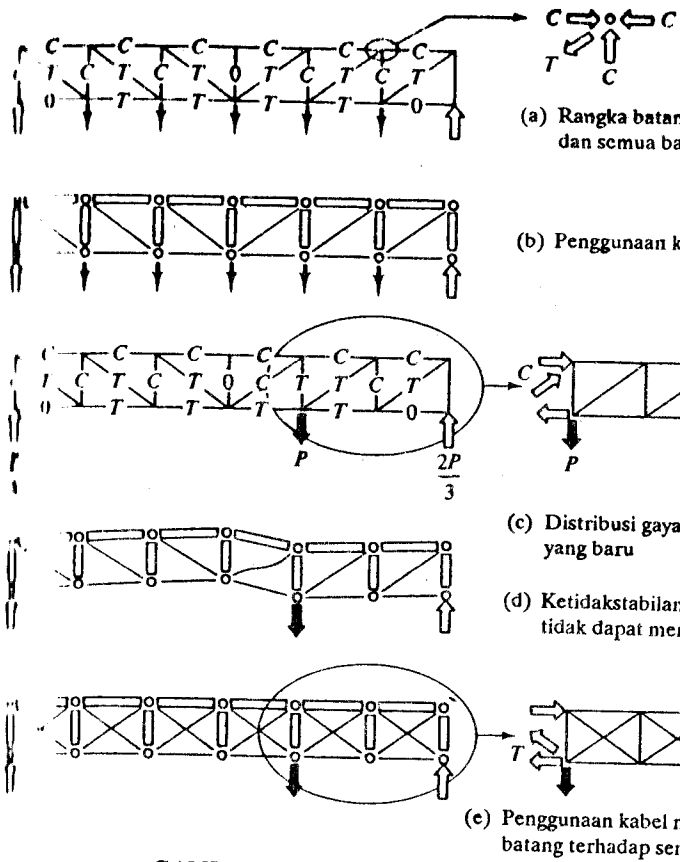
Salah satu hal yang menimbulkan pertanyaan dalam penggunaan kabel untuk rangka batang adalah masalah kestabilan. Bagian dasar dari rangka batang demikian bukan lagi merupakan segitiga kaku, melainkan bentuk khusus yang hanya stabil untuk kondisi pembebanan khusus. Pembalikan tegangan (stress reversals) dari tarik menjadi tekan dapat menyebabkan keseluruhan rangka batang menjadi tidak stabil. Pembalikan tegangan dapat terjadi apabila lokasi ataupun besar beban eksternal berubah. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–22(a–1), apabila beban bekerja pada titik hubung E, bukan pada titik F, distribusi gaya pada rangka batang tersebut akan seperti pada Gambar 4–22(b–1). Apabila pada kondisi beban pada E ini batang kabel yang digunakan, maka keseluruhan rangka batang akan tidak stabil dan akan terjadi keruntuhan. Hal ini disebabkan oleh batang BE, yang semula tarik dan didesain dengan menggunakan kabel, tidak dapat memikul gaya tekan yang timbul pada kondisi pembebanan tersebut. Batang kabel itu akan menekuk dan rangka batang tersebut akan runtuh seperti terlihat pada Gambar 4–22(b–3). Jelas bahwa dalam penggunaan kabel, kemungkinan pembaikan tegangan merupakan hal yang perlu diperhatikan. Apabila memang akan menggunakan kabel, kita harus benar-benar yakin bahwa batang kabel itu tidak akan mengalami gaya tekan pada semua kemungkinan kondisi pembebanan pada struktur tersebut.

Pada kondisi khusus, ada alternatif untuk merancang suatu batang yang dapat memikul gaya tarik maupun tekan, yaitu dengan menggunakan kabel tambahan. Pada kumpulan diagram seperti terlihat pada Gambar 4–22, jelas bahwa apabila sistem *kabel menyilang (crossed-cable system)* digunakan di tengah [lihat Gambar 4–22(e)], maka rangka batang itu akan stabil pada berbagai kondisi pembebanan. Apabila beban eksternal ada di titik F, maka kabel di antara B dan E memikul gaya tarik, dan karena itulah rangka batang tersebut stabil. Sementara itu, kabel antara F dan C akan menekuk dan tidak memikul beban. Hal sebaliknya juga berlaku apabila bebannya bekerja pada E. Dengan demikian, kabel menyilang sangat berguna dalam menjamin kestabilan rangka batang yang mengalami berbagai kondisi pembebanan.

Dengan merencanakan susunan dan orientasi batang secara hati-hati, kabel dapat digunakan secara efektif pada rangka batang yang lebih kompleks daripada yang telah dibahas di atas. Cara-cara menentukan orientasi batang akan dibahas pada Bab 4.4.4. Perlu dicatat di sini bahwa rangka batang yang mempunyai pola seperti terlihat pada Gambar 4–23(a) selalu mempunyai diagonal tarik (untuk kondisi pembebanan seperti tergambar), sedangkan rangka batang pada Gambar 4–24(a) mempunyai batang-batang vertikal yang memikul gaya tarik. Arah diagonal yang berlawanan dengan yang ada pada rangka batang tersebut merupakan karakteristik dalam desain pembebanan simetris.



GAMBAR 4–22 Rangka batang sistem "kabel": efek perubahan kondisi pembebanan dan penggunaan "kabel-melintang". (a) dan (b) rangka batang yang stabil pada kondisi pembebanan khusus. (b) dan (d) mengilustrasikan ketidak-stabilan yang dapat terjadi apabila kondisi pembebanan berubah. (d) mengilustrasikan penggunaan kabel menyilang sebagai cara untuk membuat rangka batang tersebut stabil pada berbagai



(a) Rangka batang yang mempunyai diagonal tarik dan semua batang vertikal mengalami tekan.

(b) Penggunaan kabel pada rangka batang

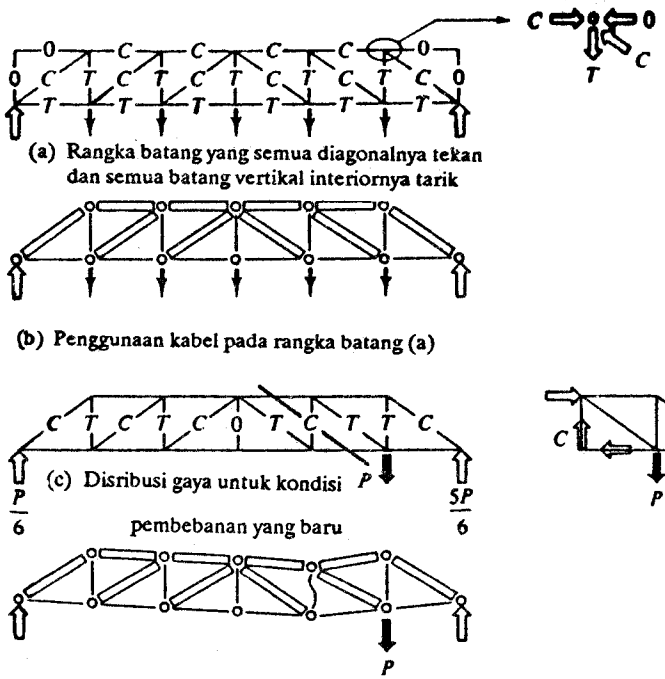
(c) Distribusi gaya untuk kondisi pembebanan yang baru

(d) Ketidakstabilan pada rangka batang karena diagonal tidak dapat memberikan gaya tekan yang diperlukan

(e) Penggunaan kabel menyilang untuk menstabilkan rangka batang terhadap sembarang pembebanan

GAMBAR 4.23 Rangka batang Pratt: distribusi gaya, penggunaan kabel, efek perubahan kondisi pembebanan.

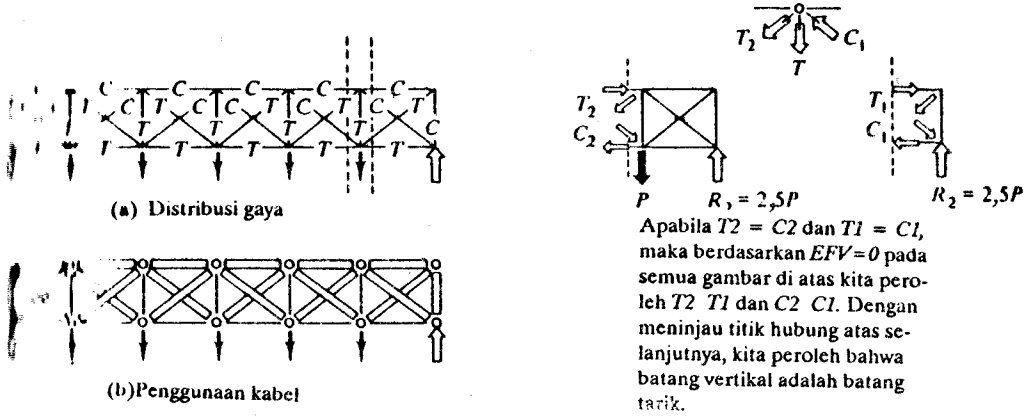
Apakah kabel dapat digunakan atau tidak pada rangka batang sangat bergantung pada berubah atau tidaknya kondisi pembebanan. Apabila kabel digunakan sebagai batang tarik, kita harus yakin bahwa batang itu tidak akan pernah mengalami gaya tarik. Seperti telah disebutkan , pembalikan tegangan pada kabel dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada rangka batang. Pembalikan tegangan biasanya disebabkan oleh adanya perubahan pola beban eksternal yang dipikul oleh rangka batang. Perhatikan apa yang akan terjadi pada dua rangka batang yang kita bahas apabila keduanya mengalami satu beban terpusat [lihat Gambar 4–23(c) dan 4–24 (c)]. Kasus yang mungkin terjadi ialah apabila beban-beban lainnya [yang semula ada pada Gambar 4–23(a) dan 4–23(b)] ditiadakan. Analisis gaya-gaya batang untuk kondisi pembebanan itu menghasilkan distribusi gaya seperti terlihat pada gambar tersebut. Jelas bahwa beberapa batang yang semula mengalami tarik menjadi batang tekan. Apabila pada batang itu yang digunakan adalah kabel, maka rangka batang tersebut akan runtuh seperti terlihat pada Gambar 4–23(d) dan 4–23(d). Hal ini mengilustrasikan suatu peninjauan dasar dalam desain. Setiap elemen pada struktur



GAMBAR 4–24 Rangka batang Hower: distribusi gaya, penggunaan kabel, efek perubahan kondisi pembebanan.

harus didesain untuk dapat memikul gaya-gaya yang mungkin timbul pada semua kondisi pembebanan yang mungkin. Hal ini dapat saja melibatkan sangat banyak kondisi pembebanan, dan tidak hanya berlaku pada struktur rangka batang yang menggunakan kabel, tetapi juga pada jenis rangka batang lainnya. Rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–23 dan 4–24 dapat dibuat stabil untuk kondisi pembebanan baru, yaitu dengan menggunakan batang yang mampu memikul gaya tekan. Alternatif lain untuk menstabilkan rangka batang pada Gambar 4–23(c) adalah dengan menggunakan kabel menyilang. Kita harus menetahui dengan pasti bahwa penambahan kabel menyilang itu memang benar menjamin kestabilan rangka batang tersebut. Ternyata penambahan kabel menyilang pada Gambar 4–24(d) tidak menjamin kestabilan. Karena alasan itulah rangka batang yang mempunyai pola demikian sangat jarang menggunakan kabel atau, kalau memang menggunakan kabel, berarti sifat beban eksternalnya adalah sedemikian hingga tidak ada kemungkinan pembalikan tegangan. Contoh hal ini adalah apabila beban mati yang dipikul oleh rangka batang sangat jauh lebih besar daripada beban hidup, atau bahkan mungkin tidak ada beban hidup sama sekali.

Perlu kita ketahui juga satu jenis konfigurasi batang lainnya yang sering dijumpai pada rangka batang yang mempunyai tinggi konstan. Bentuk yang dimaksud adalah konfigurasi statis tak tentu (secara internal) seperti terlihat pada Gambar 4–25(a). Distribusi gaya secara pendekatan untuk pembebanan yang tergambar didasarkan atas asumsi bahwa diagonalnya mempunyai kekakuan sama.

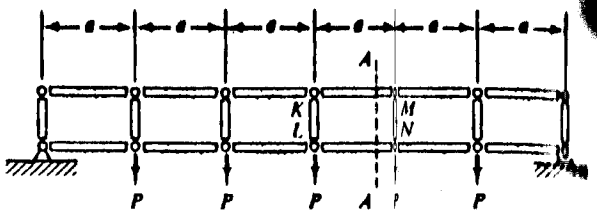


GAMBAR 4–25 Rangka batang statis tak tentu yang mempunyai batang diagonal melintang: distribusi gaya, penggunaan kabel.

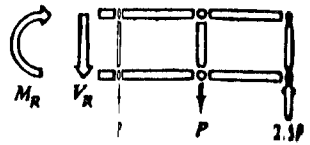
4.4.4 Kontrol Distribusi Gaya pada Rangka Batang

Untuk membuat penggunaan elemen tarik dan tekan lebih efisien, kita mengatur kemungkinan-kemungkinan distribusi gaya pada rangka batang. Salah satu caranya adalah membuat sebanyak mungkin batang panjang yang mengalami tarik, bukan tekan. Hal ini umumnya dapat dilakukan dengan memperhatikan bagaimana orientasi batang-batangnya. Sebagai contoh, perhatikan rangka batang yang mempunyai tinggi konstan pada Gambar 4–26(a). Misalkan kita ingin mengontrol gaya pada batang-batang diagonal. Dengan mempelajari keseimbangan pada potongan-potongan struktur tersebut kita dapat menentukan pola batang sedemikian hingga mengalami sifat gaya yang kita inginkan. Dari keseimbangan vertikal bagian kanan potongan 1 *A* kita peroleh bahwa total beban vertikal dan reaksi yang berarah ke atas harus diimbangi oleh total gaya dalam yang berarah ke bawah. Pada bagian struktur tersebut, batang tepi atas maupun bawah tidak dapat menghasilkan komponen gaya pada arah vertikal, sedangkan batang diagonal dapat. Jadi, gaya dalam yang mengimbangi beban total pada bagian struktur itu, hanyalah gaya pada batang diagonal. Diagonal itu dapat mempunyai orientasi seperti pada Gambar 4–26(c) atau pada Gambar 4–26(d). Pada kedua gambar tersebut arah gaya batang diagonalnya harus sedemikian hingga komponen vertikalnya berarah ke bawah (mengimbangi total beban dan reaksi yang berarah ke atas). Implikasi hal ini pada Gambar 4–26(c) adalah batang diagonal *KN* adalah batang tekan sedangkan batang diagonal *LM*

(a) Rangka batang yang tingginya konstan; batang diagonal belum ditambahkan

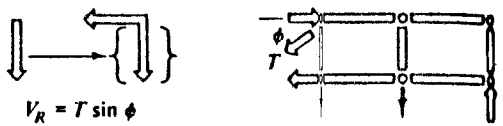


(b) Pada potongan *A-A*, rangka batang harus memberikan V_R dan M_R yang arahnya seperti tergambar.



(c) Dengan memasang diagonal dari *K* ke *N* berarti gaya tekan akan timbul pada batang karena fungsinya memberikan gaya geser tahanan yang harus berarah ke bawah.

(d) Orientasi sebaliknya pada batang diagonal akan menyebabkan batang mengalami tarik agar gaya geser tahanan dapat diberikan.



GAMBAR 4–26 Mengontrol distribusi gaya. Batang diagonal harus dapat memberikan gaya geser internal V_R. Orientasi batang diagonal yang diperlihatkan pada (c) menyebabkan diagonal tersebut mengalami tekan, sementara orientasi pada (d) menyebabkan batang tersebut mengalami tarik.

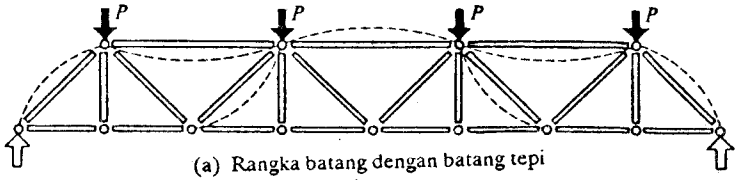
pada Gambar 4–26(d) adalah batang tarik. Selanjutnya kita sebagai perencana dapat menentukan dan menggunakan yang tarik ataukah yang tekan pada lokasi tersebut.

Penjelasan yang serupa dengan di atas juga dapat dilakukan untuk batang-batang pada Gambar 4–26(a). Kita dapat melihat orientasi yang menjadikan batang diagonal mengalami tarik, juga orientasi yang menjadikan batang diagonal mengalami tekan.

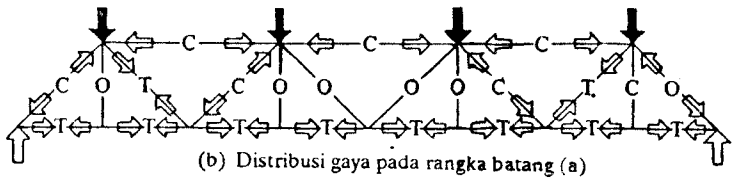
Gambar 4–23(a) memperlihatkan rangka batang yang mempunyai pola batang yang diagonalnya mengalami tarik, sedangkan Gambar 4–24(i) memperlihatkan rangka batang yang mempunyai pola batang yang diagonalnya mengalami tekan. Perhatikan bahwa sifat tarik atau tekannya batang diagonal mempengaruhi sifat gaya batang di dekatnya. Apabila diagonalnya mengalami tarik, maka elemen vertikal di sebelahnya mengalami tekan. Sebaliknya, apabila diagonalnya mengalami tarik, maka batang vertikal di sebelahnya mengalami tekan.

4.4.5 Tekuk pada Batang Tekan: Pengaruh Pola Segitiga

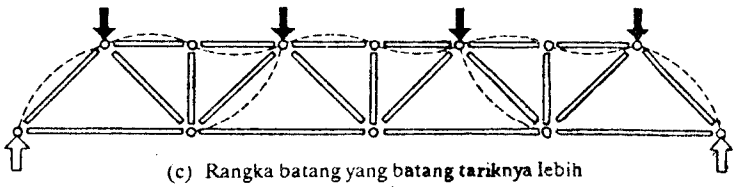
Kebergantungan kapasitas pikul beban suatu batang tekan pada panjangnya serta tujuan desain agar batang tekan tersebut relatif pendek sering kali mempengaruhi pola segitiga yang digunakan. Perhatikan rangka batang pada Gambar 4–27(a) dan distribusi gaya pada batang-batangnya seperti terlihat pada Gambar 4–27(b). Apabila batang-batang yang mengalami tekan adalah batang yang relatif panjang, maka batang tersebut dapat menekuk seperti terlihat pada Gambar 4–27(a) (arah tekuk yang diperlihatkan adalah sembarang). Batang tarik tidak mempunyai kecenderungan menekuk demikian. Perhatikan bahwa batang-batang tepi atas adalah batang yang relatif panjang dan memikul gaya tekan yang relatif besar. Kita dapat saja mendesain batang tepi atas tersebut dan memperkecil panjang efektifnya, yaitu dengan menggunakan *bracing (pengaku)*. Ada empat batang nol pada konfigurasi tersebut [lihat tanda 0 pada Gambar 4–27(b)]. Terhadap kestabilan rangka batang secara keseluruhan, ada



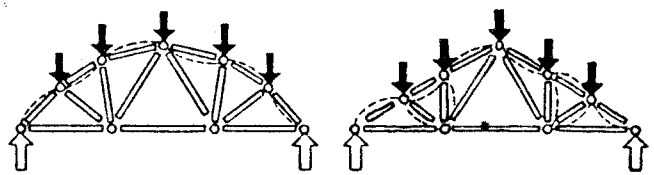
(a) Rangka batang dengan batang tepi atas yang panjang



(b) Distribusi gaya pada rangka batang (a)



(c) Rangka batang yang batang tariknya lebih panjang daripada batang tekan



(d) Rangka batang yang batang tariknya lebih panjang daripada batang tekan

GAMBAR 4–27 Tekuk Batang: hubungannya dengan pola segitiga.

atau tidaknya batang nol ini tidak menentukan. Oleh karena itu, kita dapat menggunakan alternatif lain, yaitu memindahkan batang nol tersebut menjadi pola seperti terlihat pada Gambar 4–27(c). Batang-batang ini sekarang berfungsi sebagai pengekang titik tengah batang tepi atas sehingga panjang efektif batang tepi atas menjadi setengahnya. Ini akan sangat mengurangi material yang dibutuhkan untuk desain batang tepi atas.

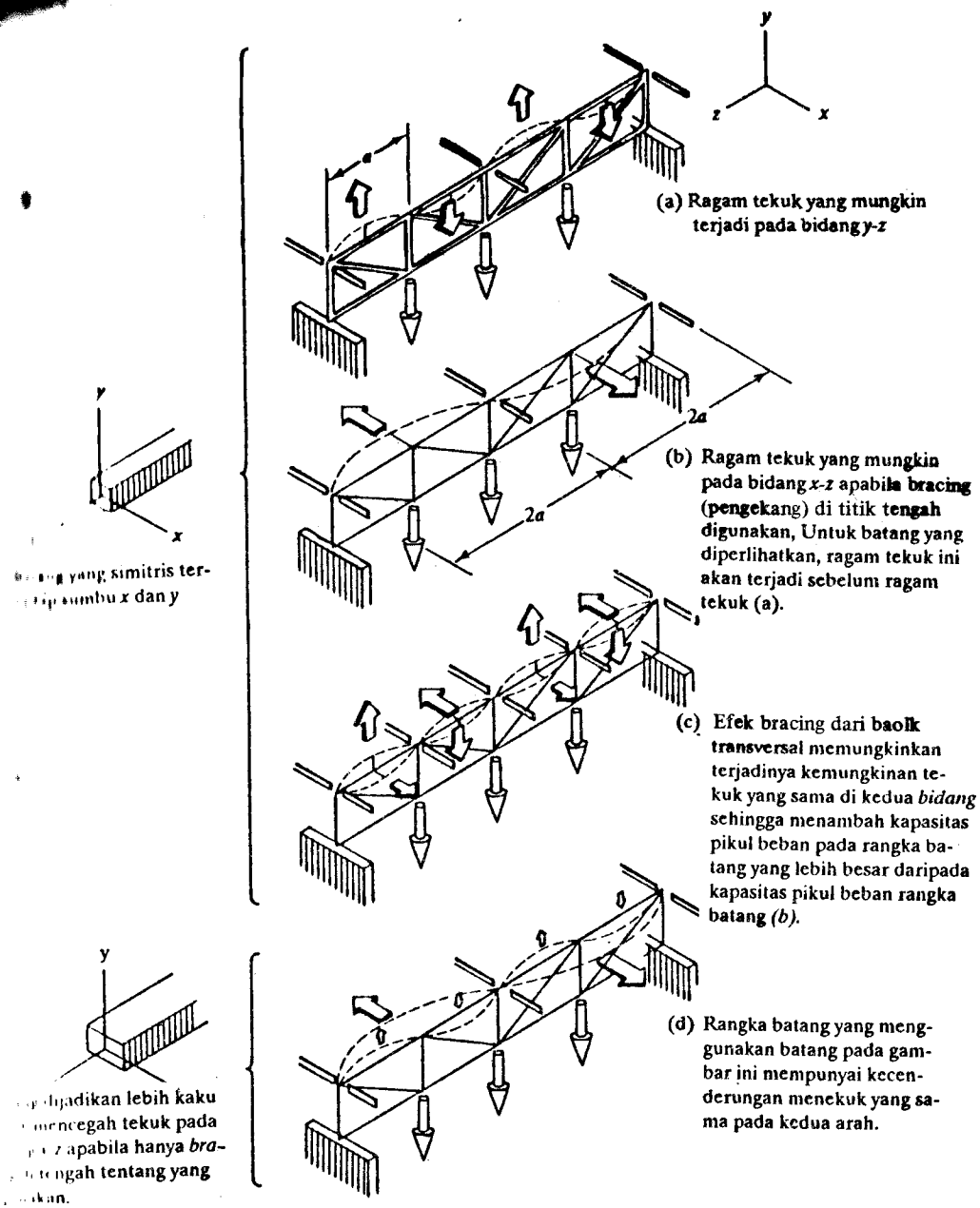
Penggunaan *bracing* demikian sangat berpengaruh pada kapasitas pikul beban batang-batang tepi atas. Memperkecil panjang efektif menjadi setengahnya berarti memperbesar gaya kritis penyebab tekuk sebesar empat kalinya (lihat Bab 7 II). Dengan demikian, penampangnya dapat jauh lebih kecil dibandingkan dengan yang diperlukan pada konfigurasi pada Gambar 4–27(c) lebih diinginkan dibandingkan dengan konfigurasi pada Gambar 4–27(c) lebih diinginkan dibandingkan dengan

diperlukan pada konfigurasi 4–27(a). Perhatikan bahwa gaya pada batang tepi atas tersebut tidak berubah, yang berubah hanyalah panjangnya. Karena itulah konfigurasi pada Gambar 4–27(c) lebih diinginkan dibandingkan dengan konfigurasi pada Gambar 4–27(a). Perlu diperhatikan bahwa pada konfigurasi 4–27(c) ini batang yang terpanjang adalah batang-batang tepi bawah yang mengalami tarik. Hal ini menguntungkan karena luas penampang yang diperlukan untuk memikul gaya tarik tidak bergantung pada panjangnya. Kita selalu menginginkan rangka batang yang mempunyai karakteristik sebanyak mungkin batang tekan pendek dan batang tarik panjang. Prinsip ini sering digunakan sebagai dasar dalam desain rangka batang.

Pada keadaan sesungguhnya, batang-batang yang berfungsi sebagai *bracing* juga mengalami gaya, meskipun kecil. Penentuan ukuran batang-batang itu secara tepat merupakan masalah yang cukup rumit, dan tidak termasuk ke dalam ruang lingkup buku ini. Sering kali orang menggunakan ukuran minimum yang telah diperoleh sebelumnya secara empiris. Akan tetapi, perlu kita ingat benar bahwa apabila ada kemungkinan *bracing* tersebut mengalami gaya yang diakibatkan oleh kondisi pembebanan lain yang mungkin terjadi, hal ini harus kita tinjau, dan desain batang tersebut tidak boleh didasarkan hanya atas ukuran minimum empiris.

4.4.6 Tekuk Lateral Batang pada Rangka Batang

Diskusi di atas hanya meninjau perilaku rangka batang pada bidangnya. Meskipun strukturnya dapat dianggap struktur bidang, perilaku *keluar-bidang* juga merupakan hal penting. Perhatikan rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–28. Anggap bahwa batang tepi atas mempunyai penampang yang simetris terhadap sumbu y dan z. Contoh penampang demikian adalah penampang bujur-sangkar, penampang lingkaran, atau juga pipa. Lebih tepat lagi kita katakan bahwa penampang batang tepi atas mempunyai *momen inersia* yang sama terhadap kedua sumbu (tidak harus simetris secara geometris, lihat Lampiran 3). Apabila batang tepi atas itu memikul gaya tekan, maka batang tersebut mempunyai kecenderungan yang sama untuk menekuk pada bidang $x - z$ maupun bidang $y - z$. Hal yang harus diperhatikan dalam desain ialah agar kecenderungan menekuk *keluar bidang* (yaitu menekuk pada bidang $x - z$) tidak mengurangi kapasitas pikul rangka batang.



(a) Ragam tekuk yang mungkin terjadi pada bidang *y-z*

(b) Ragam tekuk yang mungkin pada bidang *x-z* apabila bracing (pengekang) di titik tengah digunakan, Untuk batang yang diperlihatkan, ragam tekuk ini akan terjadi sebelum ragam tekuk (a).

(c) Efek bracing dari baolk transversal memungkinkan terjadinya kemungkinan tekuk yang sama di kedua *bidang* sehingga menambah kapasitas pikul beban pada rangka batang yang lebih besar daripada kapasitas pikul beban rangka batang *(b)*.

(d) Rangka batang yang menggunakan batang pada gambar ini mempunyai kecenderungan menekuk yang sama pada kedua arah.

...yang simitris terhadap sumbu *x* dan *y*

...dijadikan lebih kaku ...mencegah tekuk pada ... *z* apabila hanya *bra-* ...tengah tentang yang ...kan.

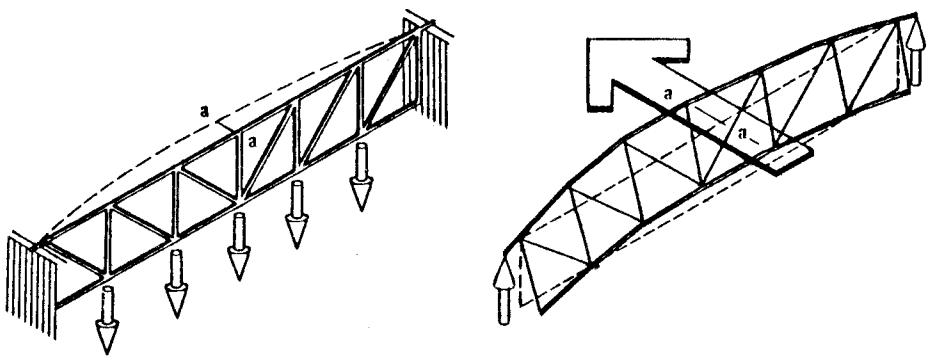
GAMBAR 4–28 Tekuk lateral elemen struktur rangka batang: penggunaan elemen struktur transversal sebagai *bracing*.

Anggap bahwa balok transversal digunakan untuk menyalurkan beban-beban dari penutup atap ke rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–28(b). Balok-balok ini juga berfungsi memperkaku batang tepi atas dalam bidang horizontal $x - z$ pada titik-titik tumpu balok tersebut. Karena batang tepi atas hanya diperkaku pada titik-titik tersebut, maka masih ada kemungkinan batang tepi atas menekuk dengan pola seperti terlihat pada Gambar 4–28(b). Panjang efektif batang tepi atas, sehubungan dengan tahanan terhadap tekuk, adalah $2a$, bukan a. Batang batang pada bidang vertikal tidak dapat mencegah terjadinya tekuk tersebut. Dari tinjauan desain, kita perlu menahan rangka batang seperti terlihat pada Gambar 4–28(c). Hal ini akan menyebabkan panjang efektif batang tepi atas sama pada kedua arah. Alternatif lain adalah dengan menggunakan geometri penampang lain yaitu yang mampu mencegah tekuk pada bidang horizontal tersebut. Secara diagram hal ini diperlihatkan dalam Gambar 4–28(d) di mana batang tersebut dibuat lebih kaku dalam bidang $(x - z)$. Dengan menggunakan cara yang dibahas secara rinci pada Bab 7–4, kita dapat mendesain batang sedemikian hingga potensi menekuk dalam bidang vertikal (terhadap sumbu lemah penampang, tetapi dengan panjang efektif a) sama dengan potensi menekuk dalam bidang horizontal (terhadap sumbu kuat, tetapi dengan panjang efektif $2a$). Batang demikian secara diagram diperlihatkan pada Gambar 4–28(d).

Mana di antara kedua pendekatan di atas yang lebih diinginkan untuk mengontrol tekuk batang dalam bidang horizontal, bergantung pada tinjauan desain lainnya. Yang perlu diperhatikan adalah efek jarak balok transversal pada desain penutup atap. Karena itulah dalam desan penutup atap, penentuan jarak ini perlu diperhatikan.

4.4.7 Tekuk Lateral Susunan Batang

Ada rangka batang yang kita sebut *berdiri bebas (free-standing)* seperti terlihat pada Gambar 4–29). Pada struktur demikian, selain ada kemungkinan tekuk setiap batang

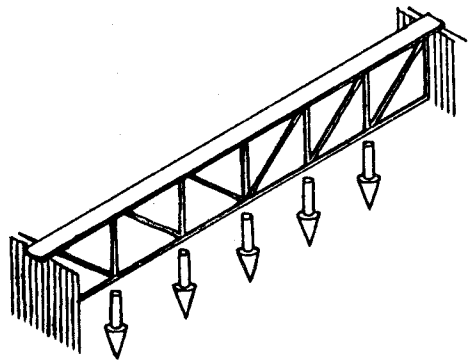


(a) Rangka batang sebelum mengalami tekuk lateral

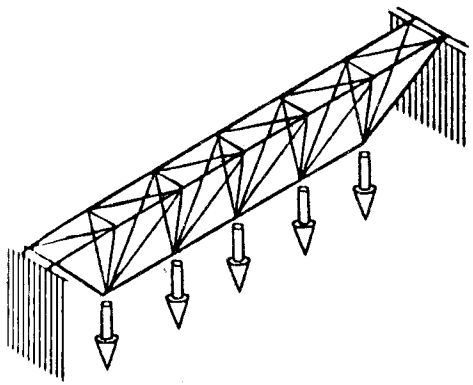
(b) Tekuk lateral pada rangka batang

GAMBAR 4–29 Tekuk lateral rangka batang bidang yang tidak mempunyai *bracing.*

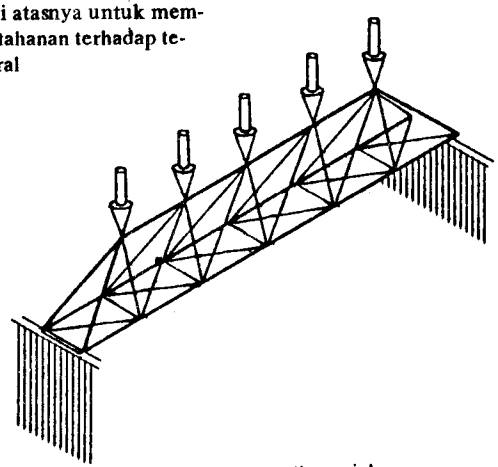
ada juga kemungkinan tekuk lateral yang melibatkan sebagian besar struktur. Jenis tekuk demikian diperlihatkan dalam Gambar 4–29. Karena tekuk seperti itulah maka rangka batang yang berdiri bebas tidak diinginkan. Pada gambar tersebut, semua batang tepi atas mengalami gaya tekan sehingga *seluruh* rangka batang dapat mengalami tekuk seperti tergambar. Dalam desain, pencegahan fenomena ini bukan merupakan hal yang mudah. Seluruh panjang rangka batang dapat dipandang sebagai panjang efektif batang tekan panjang. Sekalipun demikian, untuk mencegah jenis tekuk tersebut kita dapat menggunakan balok transversal yang dipasang pada batang tepi atas.



(a) Rangka batang yang diperilaku pada tepi atasnya untuk memberikan tahanan terhadap tekuk lateral



(b) Rangka batang tiga dimensi: lebar bidang atas memberikan tahanan terhadap tekuk lateral.



(c) Rangka batang tiga dimensi: batang samping yang miring memberikan tahanan terhadap tekuk lateral.

GAMBAR 4–30 Tekuk lateral susunan batang pada rangka batang berdiri-bebas *(free-standing)*

Apabila rangka batang harus berdiri bebas (jadi tidak diperkaku oleh elemen struktur transversal sama sekali), kita harus membuat batang tepi atas struktur tersebut sedemikian kaku dalam arah transversal untuk mencegah tekuk lateral. Hal ini dapat dilakukan dengan memperbesar dimensi lateral batang tepi atas atau dengan menggunakan pola segitiga tiga dimensi seperti telihat pada Gambar 4–30.

Bidang atas dari rangka batang tiga dimensi pada Gambar 4–30(b) memberikan tahanan yang kuat terhadap tekuk lateral. Karena itulah konfigurasi demikian sering digunakan. Jenis rangka batang pada Gambar 4–30(c) juga memberikan tahanan terhadap fenomena tekuk lateral karena orientasi batang-batang diagonal. Pada kedua-duanya, tahanan terhadap tekuk lateral yang diberikan oleh struktur tiga dimensi sangat bergantung pada jarak batang-batang pada dimensi ketiga. Jarak yang lebih besar lebih diinginkan daripada yang kecil. Penentuan jarak yang optimum merupakan masalah rumit, dan tidak termasuk ke dalam ruang lingkup buku ini. Akan tetapi, jarak yang diilustrasikan pada gambar tersebut biasanya cukup dapat di terima.

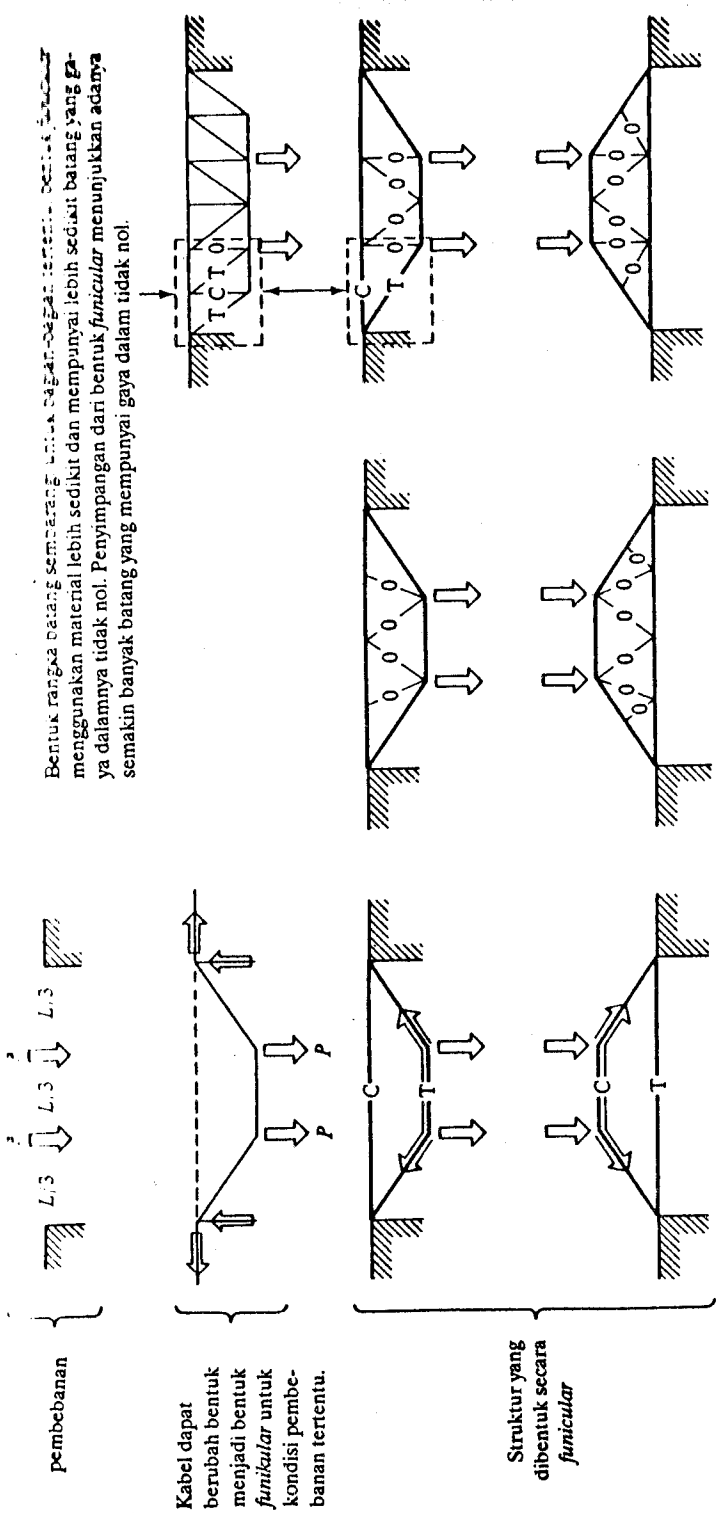
4.4.8 Rangka Batang Bidang versus Rangka Batang Ruang

Tahanan terhadap tekuk lateral pada struktur berdiri bebas merupakan satu dari sejumlah masalah yang harus ditinjau dalam menentukan pilihan antara struktur bidang dan struktur ruang. Mana yang memerlukan lebih banyak material untuk memikul beban di dalam ruang, struktur bidang, atau ruang, ataukah kedua-duanya sama? Jawaban pertanyaan ini sayangnya di luar lingkupan buku ini. Akan tetapi di sini perlu diingat bahwa pada umumnya, untuk memikul beban dan bentang yang sama, rangka batang tiga dimensi memerlukan lebih sedikit material daripada yang dibutuhkan oleh rangka batang bidang. Pada kenyataannya dapat dibuktikan bahwa apabila rangka batang digunakan sebagai elemen yang membentang satu arah, biasanya rangka batang bidang memerlukan material lebih sedikit daripada rangka batang tiga dimensi untuk fungsi yang sama.

Dengan demikian, apabila rangka batang akan digunakan sebagai elemen yang membentang satu arah, sederetan rangka batang bidang lebih menguntungkan di bandingkan dengan sederetan rangka batang tiga dimensi, khususnya apabila digunakan sebagai interior gedung, dan masalah tekuk lateral dapat diatasi dengan penggunaan sistem penutup atap atau mekanisme lainnya. Konfigurasi tiga dimensi sering kali lebih efisien daripada rangka batang bidang apabila keadaannya *berdiri bebas* (misalnya pada eksterior gedung yang atapnya digantung di atas rangka batang tersebut). Apabila rangka batang digunakan sebagai sistem dua arah, bentuk tiga dimensi juga sering kali lebih menguntungkan untuk digunakan (lihat bab 10)

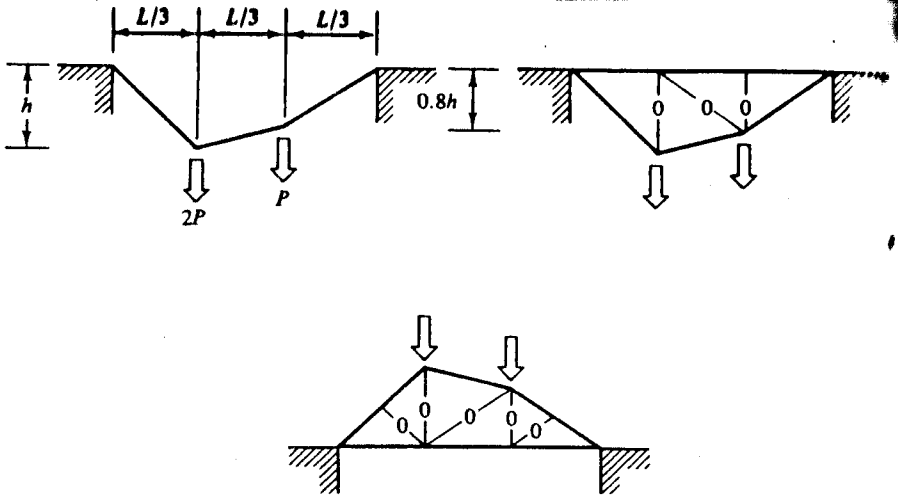
4.4.9 Rangka Batang Funicular

Meskipun setiap pola elemen segitiga yang stabil dapat dibuat sebagai rangka batang, ada bentuk-bentuk khusus rangka batang yang lebih disukai dibandingkan dengan bentuk lainnya. Bab 4.4.9 ini membahas kelompok rangka batang yang memberikan aksi pemikul beban sederhana yang unik.



(a) Rangka batang bentuk *funicular* menyalurkan beban ke tumpuan secara langsung. Tidak ada gaya yang timbul pada batanb- batang internal. Hanya batang yang membentuk *funicular* (yaitu batang tepi) yang memikul beban. Apabila bebannya berubah dari tergambar maka bentuk rangka batang ini tidak lagi *funicular* dan pada banyak batang akan timbul gaya batang.

Gambar 4-31 Rangka batang *funicular:* rangka batang yang didasarkan atas bentuk *funicular* untuk beban tertentu menunjukkan aksi pemikul beban yang unik.



(b) Hanya ada satu bentuk *funicular* untuk setiap kondisi pembebanan. Apabila mendesain rangka batang berbentuk *funicular,* kita harus berhati-hati dalam mengasumsikan kemiringan batang-batang yang sesuai dengan bentuk *funicular* (lihat Bab 5)

Gambar 4-31 (Lanjutan)

Perhatikan struktur rangka batang pada Gambar 4–31. Perhatikan bahwa bentuk keseluruhan rangka batang tersebut diturunkan dari bentuk kabel yang berdeformasi apabila mengalami beban yang sama dengan beban pada rangka batang. Karena bentuk kabel pada kondisi beban itu dipandang sebagai bentuk *funicular* untuk beban tersebut (lihat Bab 1.5), maka rangka batang yang mempunyai bentuk padanannya ini disebut juga sebagai *rangka batang funicular* untuk beban itu. Apabila rangka batang ini dianalisis dengan menggunakan cara-cara yang telah dibahas sebelum ini, ada hal yang menarik untuk dipelajari. Hal yang dimaksud adalah bahwa batang yang memikul beban hanyalah batang-batang pembentuk bagian eksternal rangka batang, sedangkan batang-batang internal merupakan batang nol, bagaimana pun pola segitiga internal yang digunakan.

Jelaslah bahwa apa yang akan terjadi pada rangka batang tersebut ialah bahwa batang-batang yang memberi bentuk garis *funicular* untuk beban tertentu menjadi dominian dalam mentransfer beban kepada tumpuan. Batang-batang lain yang bergaya nol hanya berfungsi sebagai *bracing.* Dengan demikian, aksi pemikul beban rangka batang *funicular* ini menjadi sangat sederhana.

Agar aksi pemikul beban ini benar-benar terjadi, bentuk strukturnya harus *benar-benar* sama dengan bentuk *funicular.* Sebagai contoh, tinggi relatif antara dua titik interior pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–31(b) harus secara eksak ditentukan. Tinggi relatif ini merupakan fungsi dari beban dan lokasinya. Bab 5 membahas secara rinci bagaimana menentukan secara kuantitatif bentuk eksak

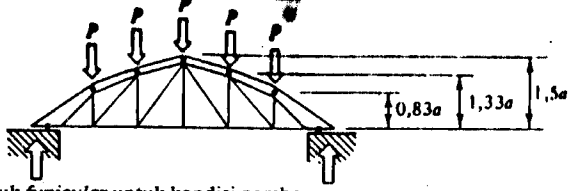
struktur *funicular* untuk kondisi pembebanan khusus. Pada umumnya, pembentukan ini akan menghasilkan konfigurasi di mana tinggi strukturalnya berbanding langsung dengan momen lentur yang ada. Gaya geser eksternal yang ada pada potongan diimbangi oleh gaya geser internal yang dihasilkan oleh komponen vertikal gaya pada batang miring paling luar, dengan akibat batang interior tidak memberikan kontribusi pada kekuatan geser, jadi merupakan batang nol. Momen eksternal pada penampang yang sama diimbangi oleh momen tahanan internal yang dihasilkan oleh komponen horizontal gaya batang tepi atas dan bawah. Batang diagonal tidak mempunyai peranan dalam memberikan momen tahanan ini.

Karena kondisi pembebanan yang berbeda dapat menghasilkan konfigurasi menyeluruh yang berbeda pula, maka bentuk *funicular* untuk satu pembebanan bukan merupakan *funicular* untuk pembebanan lain. Hal ini berarti bahwa pada batang interior rangka batang yang semula dirancang sebagai *funicular* untuk satu kondisi pembebanan mengalami kondisi pembebanan lain. Aksi-pemikul-beban pada kasus demikian akan sangat rumit.

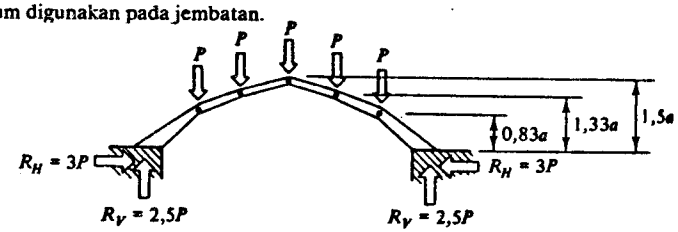
Dengan membandingkan rangka batang yang tidak mempunyai bentuk *funicular* untuk beban tertentu dengan yang mempunyai bentuk *funicular* (lihat Gambar 4–31) terlihat bahwa bentuk yang tidak *funicular* tidak hanya memerlukan total panjang batang lebih banyak, tetapi juga memerlukan lebih banyak batang yang tidak nol. Karena itulah penggunaan bentuk rangka batang *funicular* akan lebih dapat menghasilkan solusi *lebih ringan* atau *volume minimum* daripada bentuk *nonfunicular.*

Pada rangka batang yang dibentuk secara *funicular,* pemilihan triangulasi (pembentukan segitiga) oleh batang-batang internal hanya bergantung pada aturan pengaku (bracing) batang-batang tekan karena batang-batang internal ini bergaya nol. Peminimuman triangulasi ini jarang sekali dapat menahan batang-batang tekan sehingga penampang batang tekan yang diperlukan akan lebih banyak. Alternatifnya ialah membuat pola segitiga yang cukup rapat sehingga lebih dapat menahan batang tekan. Tentu saja hal ini dapat memperkecil penampang batang-batang tekan sementara menambah batang interior. Solusi yang terbaik tentunya triangulasi yang menghasilkan volume material yang minimum.

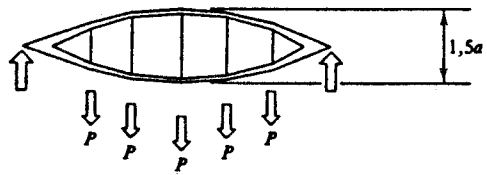
Gambar 4–32(a) mengilustrasikan rangka batang yang dibentuk secara *funicular* untuk sederetan beban terpusat. Apabila struktur tersebut dibentuk secara eksak, maka batang-batang interior akan berupa batang nol. Menarik untuk dipelajari bahwa secara konseptual batang nol dapat dengan mudah dibuang sehingga terbentuk pola yang bukan segitiga tanpa mengubah kemampuan struktur tersebut memikul beban. Fungsi batang-batang tepi bawah, yang tentu saja merupakan pengikat, juga dapat diberikan oleh *abutments* seperti terlihat pada Gambar 4–32(b). Akan tetapi, struktur yang terakhir ini dalam praktek tidak dapat digunakan karena hanya dapat stabil untuk pola pembebanan yang tepat sama dengan pola pembebanan yang direncanakan. Apabila pola bebannya berubah (misalnya salah satu bebannya tidak ada atau besarnya berubah), maka konfigurasi tersebut tidak dapat stabil lagi,dan akan terjadi keruntuhan. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya tahanan momen dan geser yang diperlukan untuk kondisi pembebanan yang baru ini. Karena itulah kita tetap harus menggunakan diagonal pada rangka batang

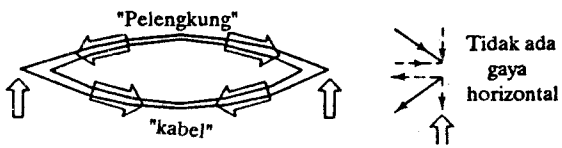


(a) Rangka batang bentuk *funicular* untuk kondisi pembebanan yang terdiri atas beban-beban terpusat berjarak sama. Gaya dalam pada batang-batang antara adalah nol untuk kondisi pembebanan tersebut, tetapi tidak nol untuk pembebanan lain. Ini adalah jenis struktur yang umum digunakan pada jembatan.



(b) Transformasi dari rangka batang (a) dengan menghapuskan batang-batang nol serta fungsi batang tepi bawah digantikan dengan sistem tumpuan tertentu. Struktur yang terbentuk ini adalah "pelengkung". Apabila segmen-segmen linear struktur tersebut dihubungkan secara sendi, maka susunan tersebut stabil hanya untuk kondisi pembebanan tersebut.





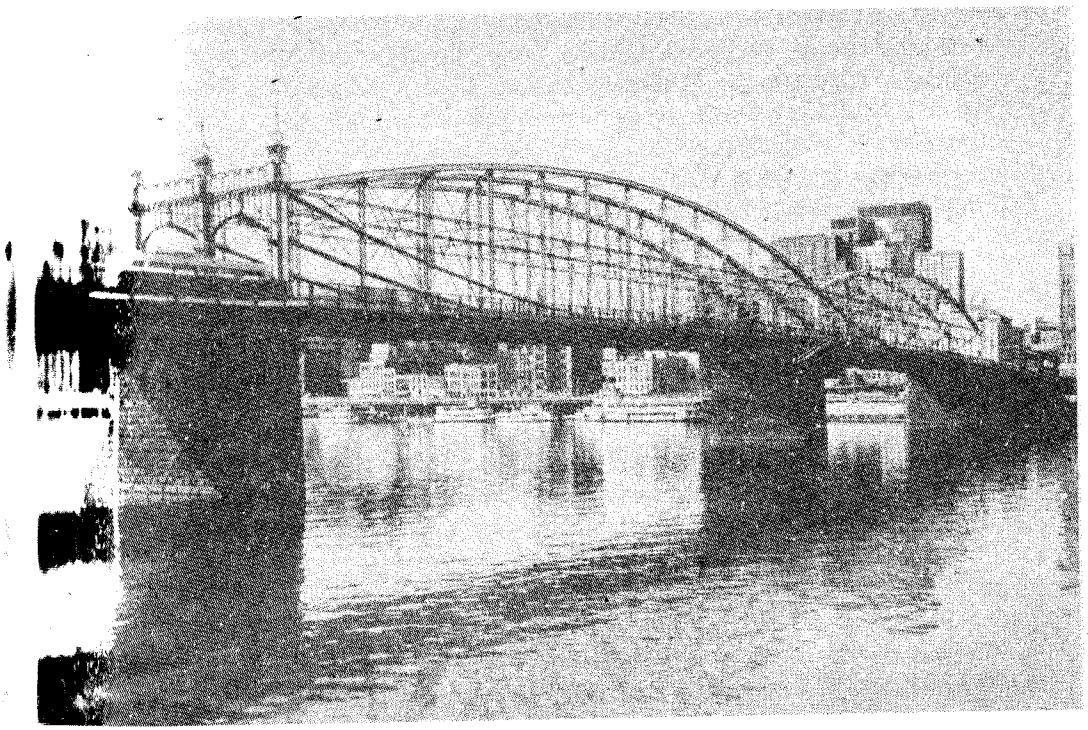
(c) Tranformasi lebih lanjut dari rangka batang (a) dan (b) menjadi struktur berbentuk lensa. Tinggi struktur pada sembarang potongan sama dengan sebelumnya. Cara meninjau aksi struktur ini adalah dengan menganggapnya sebagai kombinasi "pelengkung" dan "kabel" di mana gaya horizontal pelengkung benar-benar diimbangi oleh kabel. Dengan demikian tidak ada gaya horizontal yang timbul pada fondasi; yang ada hanyalah gaya vertikal. Struktur ini hanya stabil untuk kondisi pembebanan yang diperlihatkan.

GAMBAR 4–32 Rangka batang *funicular:* transformasi rangka batang ke bentuk yang berkaitan.

tersebut agar dapat stabil pada beban desain maupun pada kondisi beban lainnya. Fungsi batang-batang internal adalah juga untuk memikul beban lain yang mungkin ada pada struktur. Apabila beban bekerja pada titik-titik tepi bawah (bukan di titik tepi atas), maka batang-batang vertikal interior akan berfungsi sebagai batang penggantung yang menyalurkan beban ke batang tepi atas.

Struktur-struktur pada Gambar 4–32(a) dipandang sebagai rangka batang, sedangkan bentuk transformasi pada Gambar 4–32(b) adalah bentuk *pelengkung (arch).* Aksi pemikul beban untuk struktur-struktur ini pada dasarnya sama. Apabila ada kemungkinan perubahan pola beban, maka bentuk rangka batang tanpa batang diagonal ini tidak dapat digunakan; efek ini mengharuskan kita menggunakan pelengkung. Struktur pelengkung ini dibahas pada Bab 5.

Transformasi rangka batang pada Gambar 4–32(a) menarik untuk dipelajari. Struktur berbentuk *lensa* pada Gambar 4–32(c) mempunyai tinggi struktural yang sama pada semua potongan struktur dengan struktur semula. Jelaslah konfigurasi luarnya merupakan bagian dari kumpulan bentuk yang sama dengan yang ada pada rangka batang semula. Analisis rangka batang demikian akan menghasilkan batang-batang diagonal yang berupa batang nol sehingga hanya berfungsi sebagai penjamin



GAMBAR 4–33 Rangka batang *"lenticular":* Jembatan *Smithfield Street* yang melintasi Sungai Monogabela di Pittsburg (dibangun 1883). (Foto atas izin *American Society of Civil Engineers).*

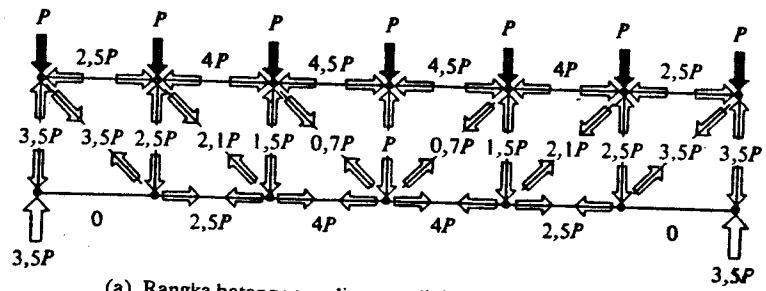
kestabilan terhadap sembarang kondisi pembebanan. Batang vertikal berfungsi menyalurkan beban sedemikian rupa sehingga batang-batang tepi bawah dan atas bergaya sama.

Alih-alih membayangkan struktur berbentuk lensa ini sebagai bentuk khusus dari rangka batang, kita dapat juga membayangkannya sebagai kombinasi dari struktur "pelengkung kabel". Dengan konsep struktur terakhir ini jelas bahwa "pelengkung" (bagian atas) diimbangi oleh "kabel" (bagian bawah) dengan konsekuensi bahwa tidak ada gaya lateral pada reaksi.

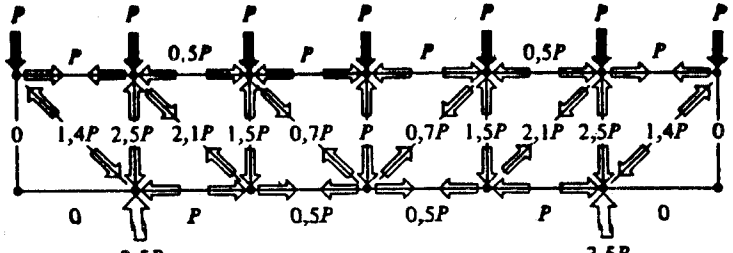
Bentuk lensa ini umum digunakan pada banyak rangka batang *lenticular* yang dibangun pada abad yang lalu untuk membuat jembatan (lihat Gambar 4–33 dan 3–9). Batang diagonal pada struktur ini pada umumnya digunakan agar struktur tersebut dapat memikul berbagai pola beban yang mungkin terjadi pada struktur tersebut.

4.4.10 Lokasi Tumpuan

Selain merencanakan bentuk rangka batang, kita juga dapat merencanakan lokasi tumpuan yang baik untuk tujuan yang kita kehendaki. Sering terjadi lokasi tumpuan merupakan variabel desain. Dari tinjauan struktural, masalahnya berupa mencari apakah ada lokasi khusus tumpuan yang dapat memberikan perilaku khusus yang diinginkan pada rangka batang. Seperti terlihat pada gaya-gaya batang yang dihasilkan, lokasi tumpuan yang diperlihatkan pada Gambar 4–34(b) lebih diinginkan dibandingkan dengan yang ada pada Gambar 4–34(a) untuk kondisi pembebanan yang sama. Besar gaya pada beberapa batang dapat jauh berkurang sehingga mengurangi banyak material yang dibutuhkan. Perlu diperhatikan bahwa pemindahan lokasi tumpuan secara lebih jauh ke dalam tidak selalu memberikan gaya yang lebih kecil. Karena itulah penentuan lokasi tumpuan merupakan hal yang menarik untuk dipelajari, dan hal ini akan dibahas secara lebih rinci pada Bab 6. Pada umumnya, untuk kondisi beban seperti tergambar, penentuan lokasi tumpuan dengan sejumlah tertentu bagian yang meminggul pada kedua ujung dapat memberikan gaya-gaya batang yang relatif lebih kecil.



(a) Rangka batang yang ditumpu diujung-ujungnya.



(b) Rangka batang yang ujungnya merupakan bagian yang meminggul

GAMBAR 4–34 Efek perubahan lokasi tumpuan: Dengan memindahkan tumpuan satu titik panel di kedua ujungnya, besar gaya-gaya batang pada banyak batang sangat berkurang.

4.4.11 Tinggi Rangka Batang

Salah satu pertanyaan yang sering muncul dalam desain rangka batang ialah berapakah tingginya atau apakah tingginya optimal. Tampaknya hal ini merupakan pertanyaan tentang desain yang mudah dijawab. Akan tetapi, sebenarnya tidaklah demikian. Seperti telah disebutkan pada Bab 4.3.4, gaya batang, yang berarti juga volume material, yang ada pada rangka batang untuk memikul beban selalu bergantung pada dimensi, termasuk juga tinggi (h) rangka batang.

Penentuan tinggi opimum yang meminimumkan volume total rangka batang bukanlah hal yang mudah, tetapi prosesnya secara konseptual cukup jelas. Untuk setiap batang, ekspresi volumenya yang didasarkan atas gaya batang yang ditulis sebagai fungsi dari variabel tinggi h ditentukan terlebih dulu. Selanjutnya kita jumlahkan setiap ekspresi volume ini hingga diperoleh ekspresi volume total rangka batang. Akhirnya ekspresi ini diminimumkan untuk mendapat tinggi yang kita cari.

Pada umumnya proses optimasi ini akan membuktikan bahwa rangka batang relatif tinggi dibandingkan bentangnya merupakan bentuk yang efisien dibandingkan dengan rangka batang yang relatif tidak tinggi. Sudut-sudut yang dibentuk oleh batang diagonal dengan garis horizontal pada umumnya berkisar dari 30° sampai 60° di mana 45° biasanya merupakan pilihan terbaik.

Selama bertahun-tahun orang telah menggunakan pedoman sederhana untuk menentukan tinggi rangka batang. Rangka batang yang memikul beban yang relatif ringan dan berjarak dekat mempunyai tinggi sekitar 1/20 dari bentangnya (misalnya rangka batang atap). Rangka batang kolektor skunder yang memikul reaksi yang dihasilkan oleh rangka batang lain biasanya lebih tinggi karena beban yang dipikul lebih besar. Tingginya sekitar 1/10 dari bentangnya. Rangka batang kolektor primer yang memikul beban sangat besar (misalnya rangka batang yang memikul beban kolom dari gedung bertingkat banyak) biasanya sangat tinggi, yaitu biasanya sama dengan tinggi tingkatnya atau sekitar 1/4 atau 1/5 dari bentangnya. Pedoman sederhana ini tidak boleh digunakan sebagai keputusan akhir dalam desain. Cara-cara terbaik dan efisien mengenai penggunaan rangka batang dalam konteks gedung

dapat saja terjadi sangat jauh dari pedoman tersebut. Bagaimana pun, pedoman ini cukup baik untuk digunakan sebagai patokan awal dalam desain. Bab 15 membahas aplikasi pedoman tersebut secara lebih rinci.

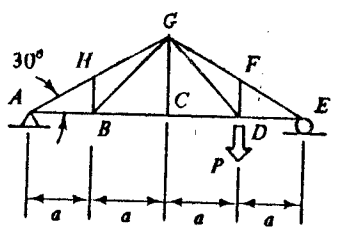
4.4.12 Kekakuan Titik Kumpul

Pada semua pembahasan di atas kita telah beranggapan bahwa semua rangka batang yang dipelajari adalah rangka batang yang sesuai dengan asumsi-asumsi yang tercantum pada awal Bab 4. Semua titik kumpul (titik hubung) merupakan hubungan sendi. Pada kenyataannya, sering terjadi hubungan sendi ideal ini tidak mungkin, atau juga tidak dikehendaki. Apabila kondisi aktual titik kumpul sedemikian rupa sehingga ujung-ujung batang yang berkumpul pada titik itu tidak bebas berotasi, maka akan ada momen lentur lokal pada batang selain juga gaya aksial yang memang ada. Apabila momen lentur ini cukup besar, maka batang tersebut harus didesain dengan memperhitungkan adanya kombinasi momen lentur dan gaya aksial itu. Besar tegangan lentur yang diakibatkan oleh kekakuan titik kumpul biasanya tidak lebih dari 10 sampai 20% dari tegangan aksial. Dalam desain prarencana, tegangan lentur skunder ini dapat kita abaikan, tetapi pada proses desain sesungguhnya, perlu diperhatikan. Efek positif dari bertambahnya kekakuan titik kumpul ialah bertambahnya kekakuan rangka batang secara keseluruhan terhadap defleksi.

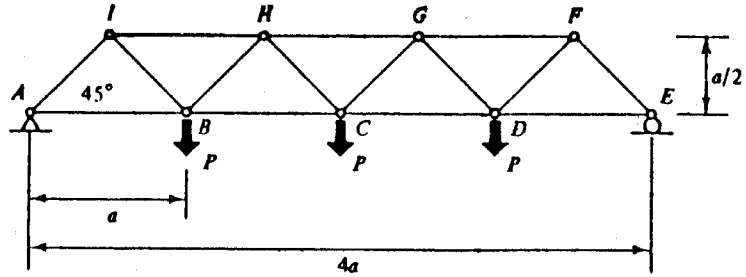
SOAL

4–1. Diskusikanlah secara rinci perkembangan metode kuantitatif pada analisis rangka batang. Pelajari juga literatur lainnya.

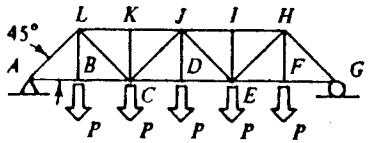
4–2. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–35(a), tentukanlah secara kualitatif sifat setiap gaya batang (tarik atau tekan). Nilai numerik tidak diminta.



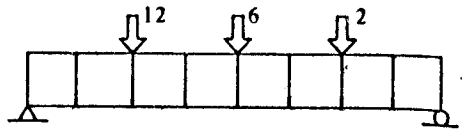
(a)



(b)



(c)



(d)

GAMBAR 4–35 Soal-soal

4–3. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–35(a), tentukanlah secara kuantitatif gaya-gaya batang pada semua batang. Disarankan untuk menggunakan metoda keseimbangan titik kumpul.

4–4. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–35(b), tentukanlah secara kuantitatif gaya-gaya batang pada semua batang. Disarankan untuk menggunakan metode keseimbangan titik kumpul.

4–5. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–10, tentukanlah secara kuantitatif gaya-gaya batang pada semua batang. Disarankan untuk menggunakan metode keseimbangan titik kumpul.

4–6. Tentukanlah gaya pada batang *GH* pada rangka batang dalam Gambar 4–35(b) dengan menggunakan metode potongan.
Jawaban: $GH = 4P$ (tekan).

4.–7. Pada rangka batang yang terlihat pada Gambar 4–9, tentukanlah secara kuantitatif gaya-gaya batang pada semua batang. Disarankan untuk menggunakan metode keseimbangan titik kumpul.

4–8. Tentukanlah secara kuantitatif gaya batang *JI*, *JE*, dan *ED* pada rangka batang dalam Gambar 4–35(c) dengan menggunakan metode potongan. Apakah yang terjadi dengan gaya batang *JI* apabila tinggi keseluruhan struktur menjadi dua kali? Apa pula yang akan terjai dengan gaya batang

JI dan *JE* apabila tinggi rangka batang secara kontinu berkurang sampai hampir mendekati nol?

4–9. Perhatikan rangka batang yang mempunyai batang tepi sejajar pada Gambar 4–35(d). Untuk stabilitas, tentu saja rangka batang ini memerlukan batang diagonal. Tambahkan elemen-elemen diagonal dalam susunan tersebut sedemikian rupa sehingga *semua* diagonal berada dalam keadaan tarik untuk kondisi pembebanan pada gambar itu.

4–10. Gambarlah diagram yang menunjukkan ukuran relatif antara batang-batang pada Gambar 4–35(c). Asumsikan bahwa untuk elemen-elemen yang mengalami tarik, digunakan kabel.

Bab 5

STRUKTUR FINICULAR: KABEL DAN PELENGKUNG

5.1 PENDAHULUAN

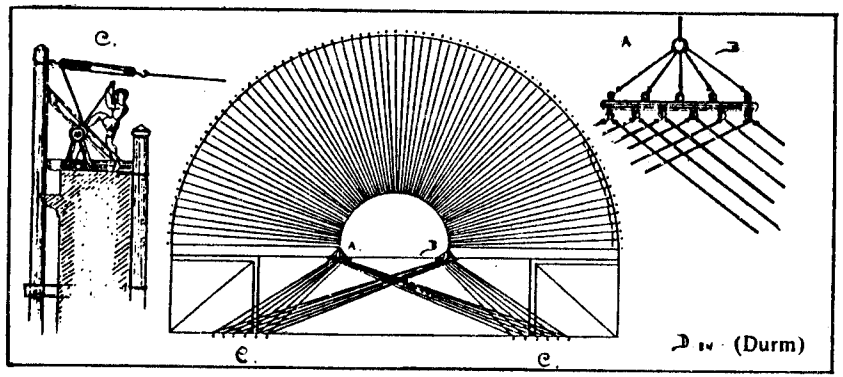
5.1.1 Struktur Funicular

Ada jenis-jenis struktur yang telah banyak digunakan oleh perencana gedung, yaitu struktur *pelengkung* dan struktur kabel. Kedua jenis struktur yang berbeda ini mempunyai karakteristik dasar struktural yang sama, khususnya dalam hal perilaku strukturnya.

Kabel yang mengalami beban eksternal tentu akan mengalami deformasi yang bergantung pada besar dan lokasi beban eksteral. Bentuk yang didapat khusus untuk beban itu ialah bentuk *funicular* (sebutan *funicular* berasal dari bahasa Latin yang berarti "tali"). Hanya gaya tarik yang dapat timbul pada kabel. Dengan membalik bentuk struktur yang diperoleh tadi, kita akan mendapat struktur baru yang benar-benar analog dengan struktur kabel, hanya sekarang gaya yang dialami adalah gaya tekan. Secara teoretis, bentuk yang terakhir ini dapat diperoleh dengan menumpuk elemen-elemen yang dihubungkan secara tidak kaku (rantai tekan) dan struktur yang diperoleh akan stabil. Akan tetapi, sedikit variasi pada beban akan berarti bahwa strukturnya tidak lagi merupakan bentuk *funicular* sehingga akan timbul momen lentur dan gaya geser akibat beban yang baru ini. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya keruntuhan pada struktur tersebut sebagai akibat dari hubungan antara elemen-elemen yang tidak kaku, tidak dapat memikul momen lentur. Karena bentuk struktur tarik dan tekan yang disebutkan di atas mempunyai hubungan dengan tali tergantung yang dibebani, maka kedua jenis struktur disebut sebagai struktur *funicular*.

5.1.2 Kabel

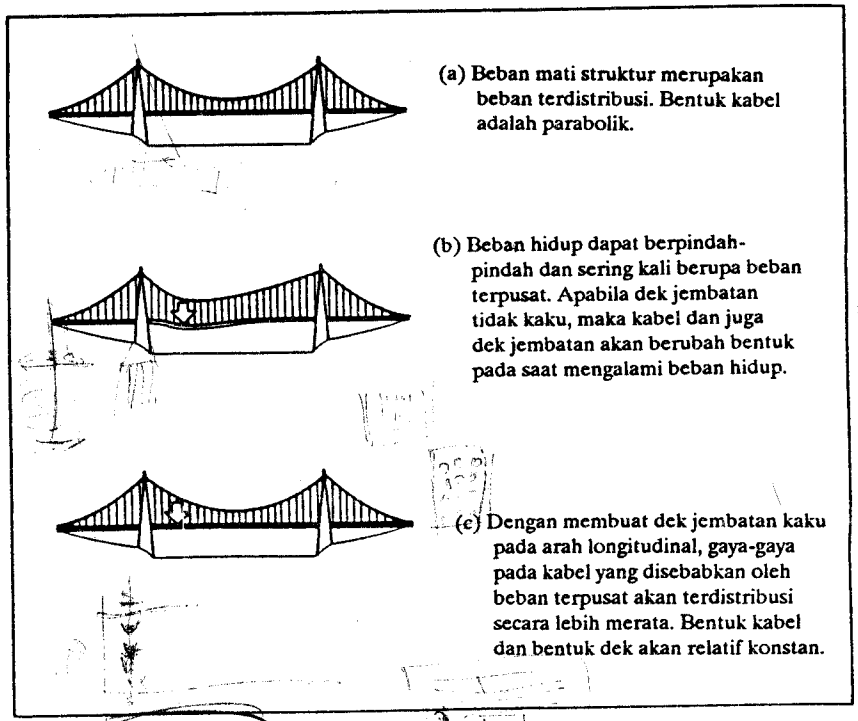
Banyak bangunan yang menggunakan struktur funicular. Kita tinjau struktur tarik dahulu. Banyak contoh struktur demikian. Sebagai contoh, jembatan gantung yang semula dikembangkan di Cina, India, dan Amerika Selatan adalah struktur *funicular* tarik. Ada struktur jembatan kuno yang menggunakan tali, ada juga yang menggunakan bambu. Di Cina ada jembatan yang menggunakan rantai, yang dibangun pada sekitar abad pertama SM. Struktur kabel juga banyak digunakan pada gedung, misalnya struktur kabel yang menggunakan tali. Struktur ini dipakai sebagai atap amfiteater Romawi yang dibangun sekitar tahun 70 SM seperti terlihat pada Gambar 5.1. Sekalipun kabel telah lama digunakan, pengertian teoretisnya masih belum lama dikembangkan. Di Eropa, jembatan gantung masih belum lama digunakan meskipun struktur rantai-tergantung telah pernah dibangun di Alpen Swis pada tahun 1218. Teori mengenai struktur ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1595, yaitu sejak Fausto Veranzio menerbitkan gambar jembatan gantung. Selanjutnya pada tahun 1741 dibangun jembatan rantai di Durham County, Inggris. Jembatan ini mungkin merupakan jembatan gantung pertama di Eropa.



GAMBAR 5-1 Struktur atap dengan menggunakan kabel pada *Roman Colosseum*, dibangun sekitar tahun 70 SM. Kabel tali membentang secara radial melintasi struktur terbuka. Bentang struktur adalah 620 ft (188 m) pada sumbu major dan 513 ft (156 m) pada sumbu minor (Dari Durm).

Titik balik penting dalam evolusi jembatan gantung terjadi pada awal abad ke-19 di Amerika, yaitu pada saat James Findley mengembangkan jembatan gantung yang dapat memikul beban lalu lintas. Findley membangun jembatannya untuk pertama kali pada tahun 1810 di Jacobs Creek, Uniontown, Pennsylvania dengan menggunakan rantai besi fleksibel. Inovasi Findley bukanlah kabelnya, melainkan penggunaan *dek jembatan yang diperkaku* yang pengkakunya diperoleh dengan menggunakan rangka batang kayu. Penggunaan dek kaku ini dapat mencegah kabel penumpunya berubah bentuk sehingga bentuk permukaan jalan juga tidak berubah (lihat Gambar 5-2). Dengan inovasi ini dimulailah penggunaan

jembatan gantung modern. Inovasi Findley dilanjutkan oleh Thomas Telford di Inggris dengan mendesain jembatan yang melintasi Selat Menai di Wales (1818–1826). Louis Navier, ahli matematika Prancis yang amat terkenal, membahas karya Findley dengan menulis buku mengenai jembatan gantung, *Rapport et Memoire sur les Ponts Suspends*, yang diterbitkan pada tahun 1823. Navier dalam bukunya sangat menghargai karya Findley dalam hal pengenalan dek jembatan kaku.



GAMBAR 5-2 Struktur jembatan gantung: penggunaan dek jembatan kaku.

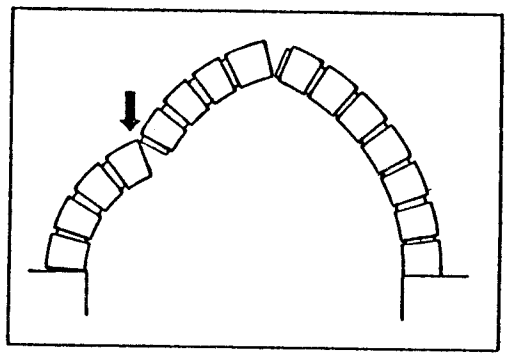
Segera setelah inovasi Findley, banyak jembatan gantung terkenal lainnya dibangun, misalnya jembatan Clifton di Inggris (oleh Isombard Brunel) dan jembatan Brooklyn (oleh John Roebling). Banyak pula jembatan modern yang dibangun setelah itu, misalnya yang membentangi Selat Messina dengan bentang tengah sekitar 5000 ft (1525 m) dan jembatan Verazano-Narrows yang bentang tengahnya 4260 ft (1300 m).

Penggunaan kabel pada gedung tidak begitu cepat karena pada saat itu belum ada kebutuhan akan bentang yang sangat besar. Meskipun James Bogardus telah memasukkan proposal kepada Crystal Palace pada New York Exhibition pada tahun 1853, yang mengusulkan atap gedung berbentuk lingkaran dari besi tuang berdiameter 700 ft (213 m) digantung dari rantai yang memancar dan ditanam

pada menara pusat, struktur pavilyun pada pameran Nijny-Novgorod yang didesain oleh V. Shookhov pada tahun 1896 dianggap sebagai awal mulainya aplikasi kabel pada gedung modern. Struktur-struktur yang dibangun berikutnya adalah pavilyun lokomotif pada Chicago World's Fair pada tahun 1933 dan Livestock Judging Pavillion yang dibangun di Raleigh, North Carolina pada sekitar tahun 1950. Sejak itu sangat banyak dibangun gedung yang menggunakan struktur kabel.

5.1.3 Pelengkung

Pasangan kabel, yaitu pelengkung, juga telah banyak digunakan pada waktu silam. Singkat kata, banyak pelengkung kuno, khususnya yang berbentuk setengah lingkaran, yang digunakan oleh bangsa Romawi, tidak benar-benar merupakan struktur *funicular* karena bentuknya sedikit menyimpang dari kurva *funicular* (lihat Bab 5.2) untuk beban yang dialaminya. Akan tetapi, karena besarnya luas penampang pelengkung tersebut, perbedaan kurva ini terhadap perilaku struktur dapat diabaikan.



GAMBAR 5-3 Mekanisme keruntuhan pelengkung. Retak terjadi pada beberapa lokasi sebelum terjadinya keruntuhan.

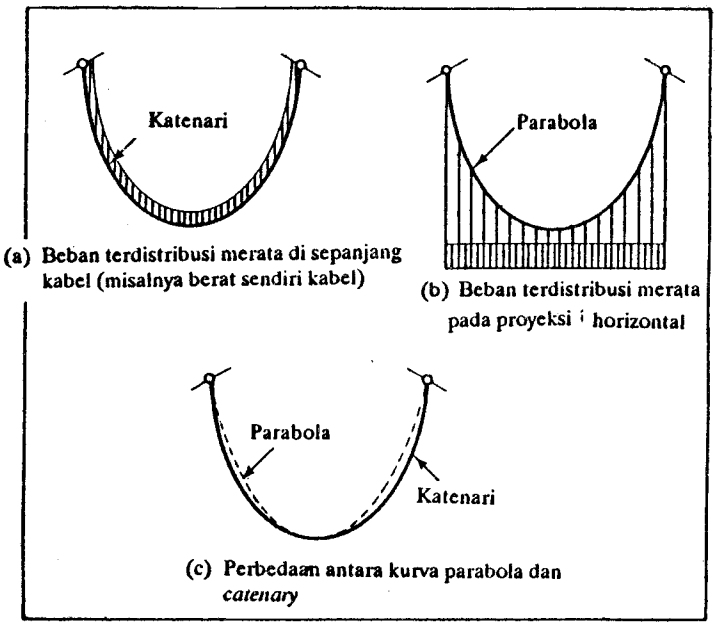
Karakteristik pelengkung kuno ialah pelaksanaannya menggunakan tumpuan sementara sampai bagian puncaknya ditumpuk. Struktur yang diperoleh ini semakin stabil apabila ditambah bobot pada puncaknya. Idenya ialah semakin besar bebannya, semakin tinggi gaya tekan yang timbul di antara blok-blok, dan semakin kecil kemungkinan terjadinya retak di antara blok (yang dapat timbul akibat penyimpangan bentuk *funicular* atau perubahan beban). Teori awal mengenai pelengkung, yang kebanyakan dikembangkan oleh rekayasawan Prancis pada abad 18, menyatakan bahwa gaya tarik pada pelengkung dapat menyebabkannya runtuh. Sekalipun demikian, pelengkung bata umumnya baru runtuh setelah terjadinya banyak retak (lihat Gambar 5-3). Gaya tekan akibat beban mati pada pelengkung bata yang bentuknya benar pada umumnya lebih besar daripada gaya tarik yang mungkin timbul sebagai akibat variasi beban hidup, karena itu struktur tersebut dapat dengan aman mengalami pola pembebanan yang tidak terlalu berbeda dengan beban hidup yang sebelumnya telah diduga.

Dengan lahirnya struktur baja dan beton, kekakuan elemen struktur pelengkung dapat lebih ditingkatkan sehingga pelengkung dapat mempertahankan bentuk dasarnya dan tidak runtuh apabila dibebani menyimpang dari yang diantisipasi. Pelengkung kaku modern sering kali diberi bentuk sesuai dengan kondisi beban primer dan mengalami gaya tekan apabila beban itu benar-benar ada. Akan tetapi, pelengkung itu juga didesain untuk mempunyai tahanan terhadap momen yang cukup untuk memikul variasi beban. Dengan demikian, struktur tersebut tidak *funicular* terhadap beban yang baru. Dalam hal demikian, pelengkung kaku secara mendasar berbeda dengan kabel fleksibel. Kabel fleksibel harus selalu berubah bentuk apabila mengalami perubahan pembebanan, jadi pada dasarnya tidak dapat mengalami momen sama sekali, sedangkan pelengkung kaku tidak mengalami momen hanya untuk satu kondisi pembebanan dan dapat mengalami momen untuk berbagai variasi beban.

5.2 PRINSIP-PRINSIP UMUM

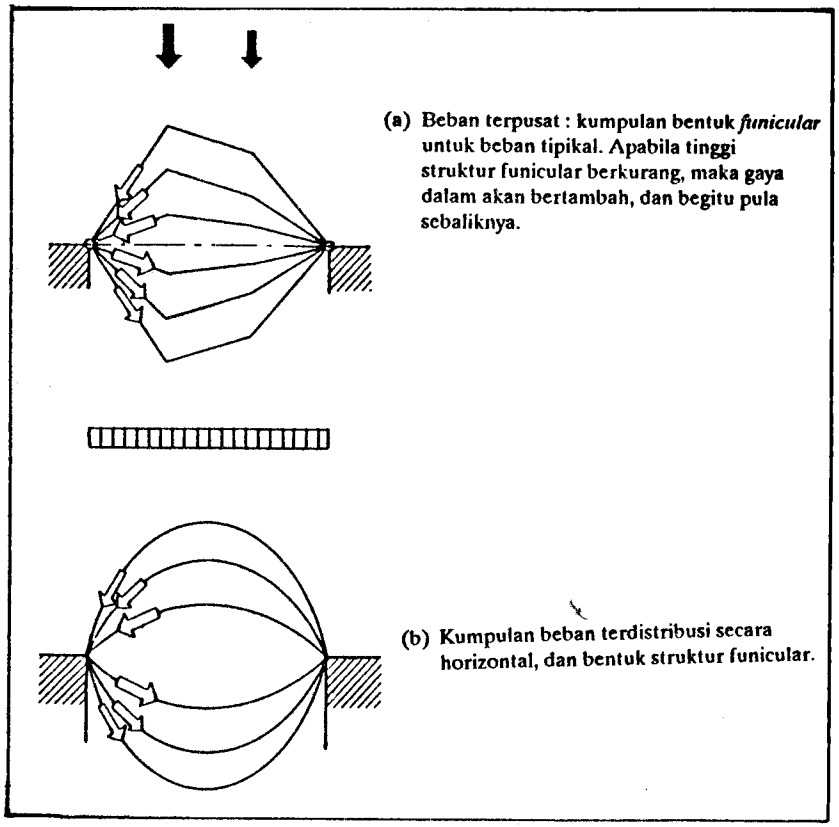
5.2.1 Bentuk Funicular

Hal penting yang mendasar dalam mempelajari pelengkung dan kabel ialah pengetahuan mengenai kurva atau kumpulan segmen elemen-garis-lurus yang membentuk *funicular* untuk pembebanan yang diberikan. Secara alami bentuk *funicular* akan diperoleh apabila kabel yang bebas berubah bentuk kita bebani. Kabel



GAMBAR 5-4 Kurva *catenary* versus parabolik. Kedua kurva sangat mirip.

yang berpenampang melintang konstan dan hanya memikul berat sendirinya akan mempunyai bentuk *catenary* (lihat Gambar 5-4). Kabel yang memikul beban vertikal yang terdistribusi secara horizontal di sepanjang kabel, seperti beban utama pada jembatan gantung yang memikul dek horizontal, akan mempunyai bentuk parabola. Kabel yang memikul beban terpusat (dengan mengabaikan berat sendirinya) akan mempunyai bentuk segmen-segmen garis lurus. Kombinasi berbagai beban akan memberikan bentuk kombinasi di mana beban terbesar akan memberikan bentuk yang dominan. Bentuk pelengkung untuk beban yang sama merupakan kebalikan sederhana dari bentuk yang telah disebutkan di atas.



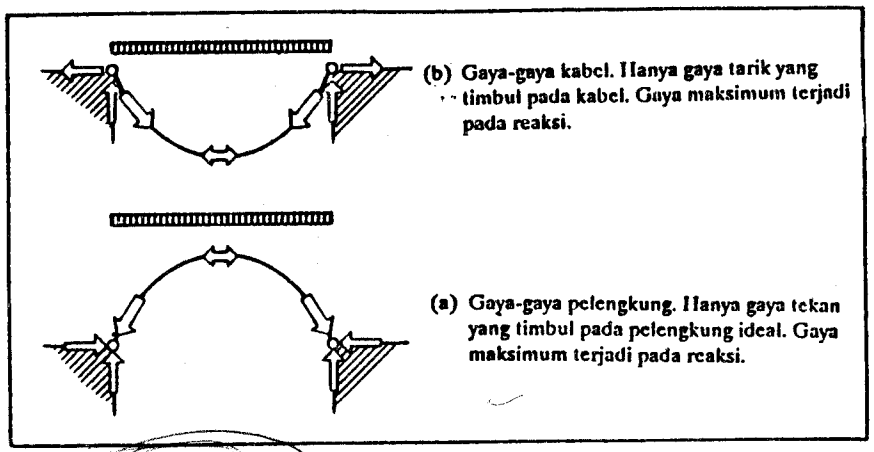
(a) Beban terpusat : kumpulan bentuk *funicular* untuk beban tipikal. Apabila tinggi struktur funicular berkurang, maka gaya dalam akan bertambah, dan begitu pula sebaliknya.

(b) Kumpulan beban terdistribusi secara horizontal, dan bentuk struktur funicular.

GAMBAR 5-5 Bentuk funicular tipikal untuk beban terpusat dan terdistribusi merata. Bentuk funicular diperoleh dengan membebani elemen struktur yang tak dapat memikul momen, misalnya kabel, dan dapat berdeformasi secara bebas. Struktur yang mempunyai bentuk funicular untuk beban tertentu, dapat memikul beban tersebut dengan cara tarik saja (yaitu kabel) atau tekan saja (yaitu pelengkung).

Seperti terlihat pada Gambar 5-5, ada kelompok bentuk *funicular* untuk beban-beban tertentu padanannya karena hanya bentuklah yang merupakan respons *funicular*, bukan nilai absolutnya.

Besar gaya yang timbul pada pelengkung ataupun kabel bergantung pada tinggi relatif bentuk *funicular* dibandingkan dengan panjangnya. Selain itu, besarnya juga bergantung pada lokasi dan besar beban yang bekerja (Lihat Gambar 5-6). Semakin tinggi pelengkung atau kabel, berarti semakin kecil gaya yang akan timbul pada struktur, begitu pula sebaliknya. Gaya reaksi yang timbul pada ujung-ujung pelengkung atau kabel juga bergantung pada parameter-parameter tersebut. Reaksi ujung mempunyai komponen vertikal dan horizontal yang harus ditahan oleh fondasi atau oleh elemen struktural lainnya, misalnya batang tarik.



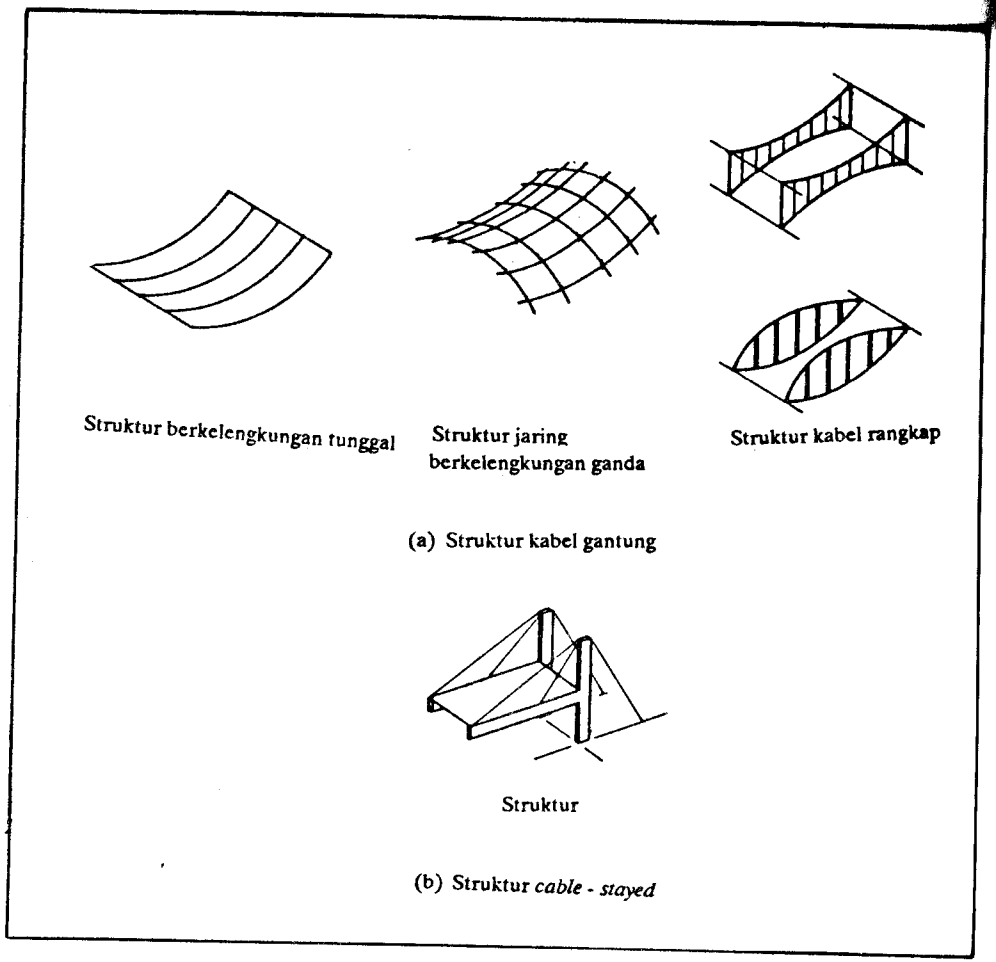
(b) Gaya-gaya kabel. Hanya gaya tarik yang timbul pada kabel. Gaya maksimum terjadi pada reaksi.

(a) Gaya-gaya pelengkung. Hanya gaya tekan yang timbul pada pelengkung ideal. Gaya maksimum terjadi pada reaksi.

GAMBAR 5-6 Distribusi gaya-gaya pada pelengkung dan kabel.

5.2.2 Tinjauan Desain Khusus

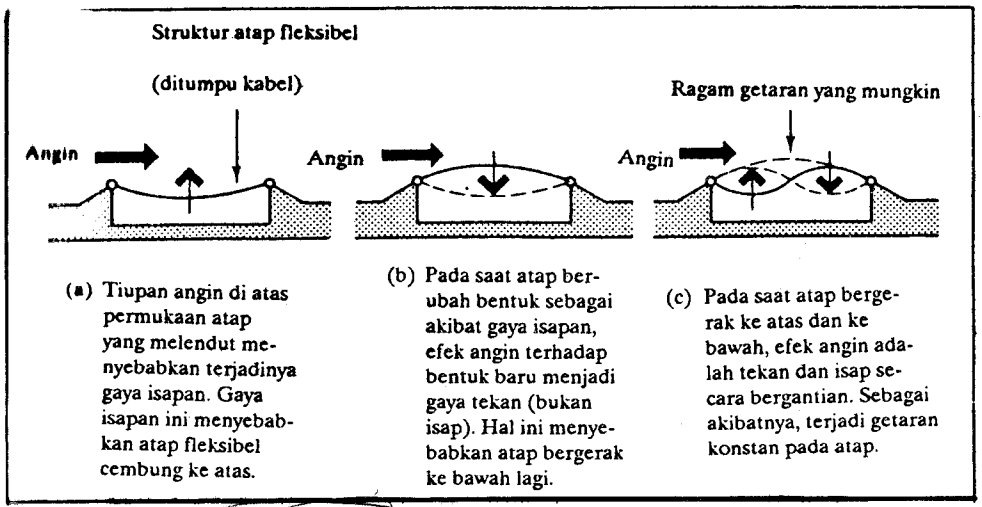
Sebelum ini kita telah membahas kabel sebagai elemen gantung tunggal sederhana. Selain itu, kabel banyak juga digunakan untuk hal lain. Struktur kabel lebih tepat dikategorikan sebagai struktur gantungan (suspension structures) atau *cable-stayed structure* (Gambar 5-7). Struktur gantungan secara khas dapat dibagi atas beberapa kelompok, yaitu (1) struktur berkelengkungan tunggal, yaitu yang dibuat dengan meletakkan kabel-kabel sejajar, menggunakan permukaan yang dibentuk oleh balok-balok atau plat yang membentang di antara kabel-kabel; (2) struktur berkelengkungan ganda, yaitu menggunakan kabel-kabel menyilang dan berkelengkungan saling berlawanan serta membentuk permukaan atap utama; dan (3) struktur kabel ganda, yaitu kabel ganda yang berkelengkungan saling berlawanan digunakan pada satu bidang vertikal. *Cable-stayed structure* pada umumnya menggunakan elemen struktur vertikal atau miring di mana kabel lurus membentang ke titik-titik kritis, atau ke elemen struktur yang membentang secara horizontal (lihat Gambar 5-7).



GAMBAR 5-7 Jenis dasar struktur kabel

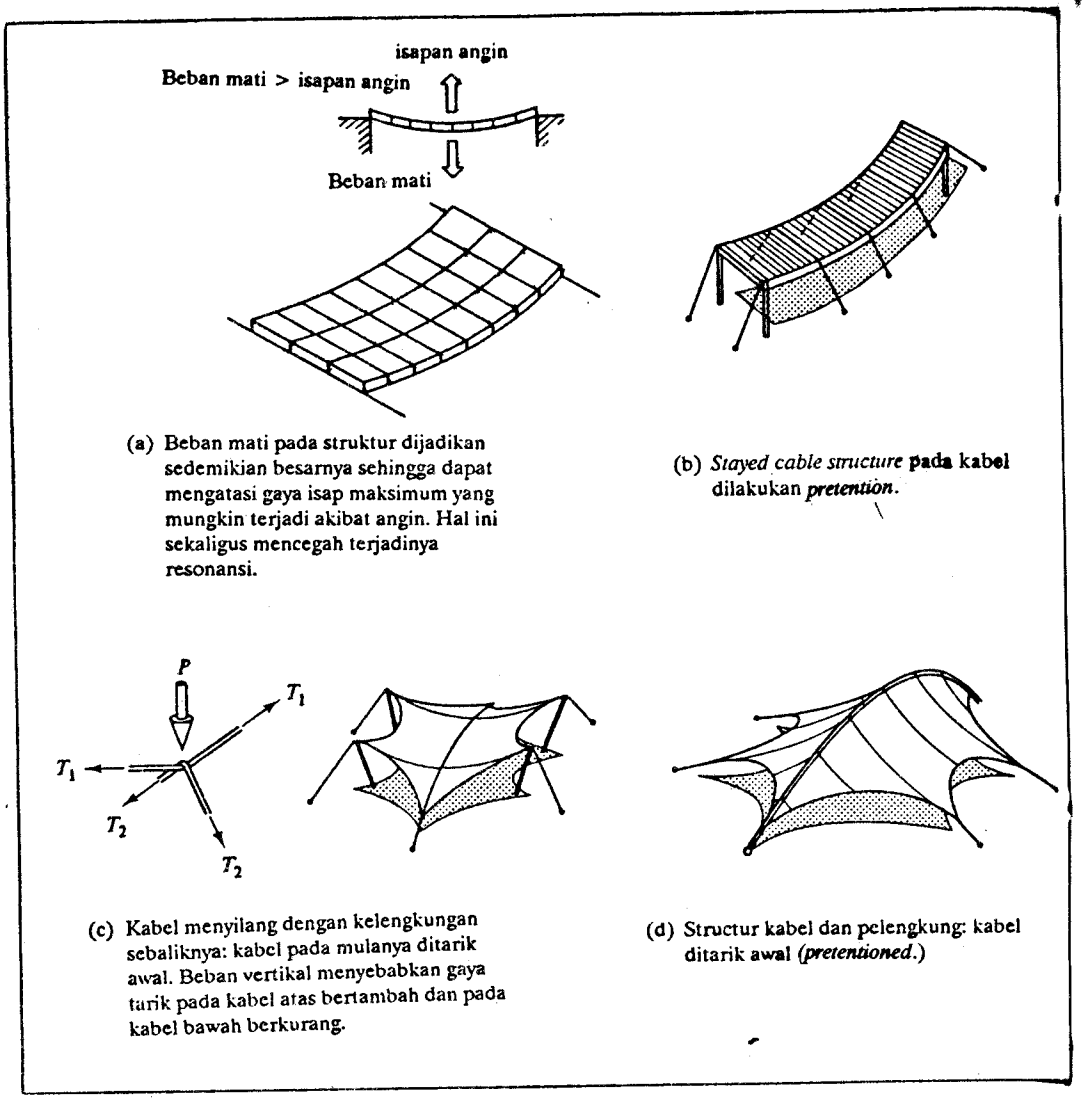
Masalah kritis dalam desain setiap struktur atap yang menggunakan kabel adalah efek dinamis yang diakibatkan oleh angin, yang tidak begitu berpengaruh kepada struktur pelengkung. Perhatikan struktur atap sederhana yang ditumpu oleh kabel pada Gambar 5-8. Apabila angin bertiup di atas atap, akan timbul gaya isap. Apabila besar isapan akibat angin ini melampaui beban mati struktur atap itu sendiri, maka permukaan atap akan mulai naik. Pada saat atap mulai naik dan bentuknya menjadi sangat berubah, gaya di atas atap akan berubah karena besar dan distribusi gaya angin pada suatu benda bergantung pada bentuk benda tersebut. Karena gaya angin berubah, maka struktur fleksibel tersebut akan berubah bentuk lagi sebagai respons terhadap beban yang baru ini. Proses ini akan berulang terus.

Sebagai akibatnya, atap tidak dapat mempunyai bentuk tetap, dan akan bergetar (flutter) selama ada gaya angin. Cara utama mencegah hal ini ialah dengan menggunakan permukaan atap yang berat sehingga *flutter* dapat dicegah oleh beban matinya. Alternatif lain adalah dengan menggunakan sistem kabel menyilang atau *stayed-cable* seperti terlihat pada Gambar 5-9.



GAMBAR 5–8 Efek dinamis angin pada struktur atap fleksibel.

Struktur jaring kabel berkelengkungan ganda sering digunakan untuk mengatasi masalah getaran (flutter) yang telah disebutkan di atas. Dengan menggunakan jaring permukaan yang terdiri atas kabel-kabel yang saling tegak lurus dan berkelengkungan saling berlawanan, efek diam dapat diperoleh dan atap tidak mempunyai kecenderungan mengalami *flutter*. Kabel bermuka ganda juga mempunyai karakteristik mencegah *flutter* pada atap. Kedua jenis struktur ini akan ditinjau secara lebih rinci pada Bab 5.4.



(a) Beban mati pada struktur dijadikan sedemikian besarnya sehingga dapat mengatasi gaya isap maksimum yang mungkin terjadi akibat angin. Hal ini sekaligus mencegah terjadinya resonansi.

(b) *Stayed cable structure* pada kabel dilakukan *pretention*.

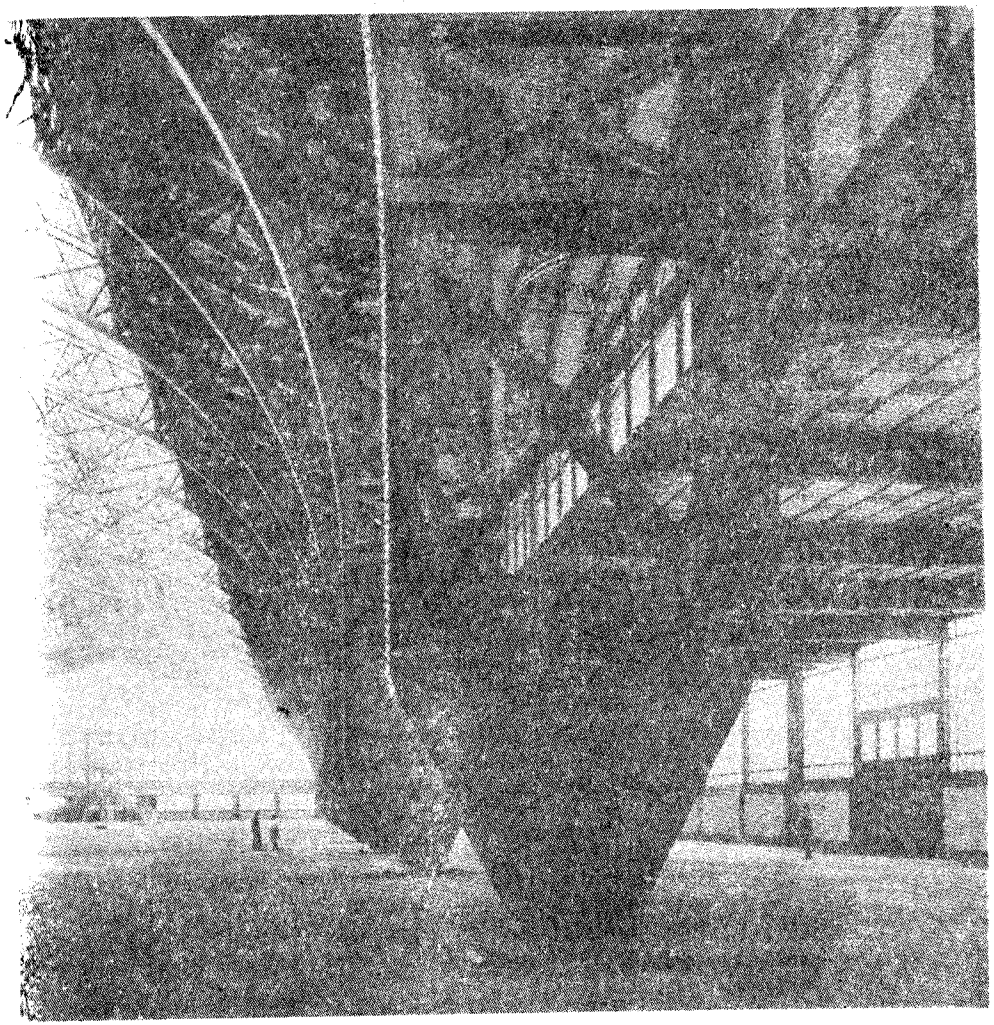
(c) Kabel menyilang dengan kelengkungan sebaliknya: kabel pada mulanya ditarik awal. Beban vertikal menyebabkan gaya tarik pada kabel atas bertambah dan pada kabel bawah berkurang.

(d) Structur kabel dan pelengkung: kabel ditarik awal *(pretentioned.)*

GAMBAR 5-9 Mencegah *flutter* pada struktur atap fleksibel yang diakibatkan oleh efek dinamik angin.

5.3.1 Pelengkung Tiga Sendi

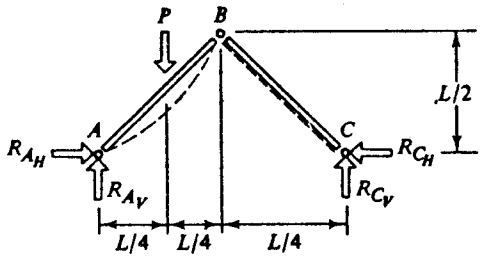
Sebagai cara mempelajari analisis dan desain struktur kabel dan pelengkung, sangat berguna untuk meninjau terlebih dulu bentuk khusus jenis struktur tersebut, yaitu *pelengkung tiga sendi.* Struktur ini bisa dapat dan bisa tidak dapat berupa struktur *funicular,* bergantung pada bentuknya. Pelengkung tiga sendi adalah struktur yang terdiri atas dua bagian kaku yang saling dihubungkan oleh sendi dan mempunyai tumpuan sendi. Apabila kedua segmen tidak membentuk *funicular* untuk satu



Gambar 5-10 Galerie des Machines, Pameran Internasional, Paris, 1889. Dasar struktur pelengkung tiga-sendi. Struktur ini mempunyai bentang 364 ft (111 m).

kondisi beban, dan ini yang memang umum terjadi, sebutan "pelengkung" tentunya agak keliru. Meskipun demikian, sebutan "pelengkung" pada struktur tiga sendi ini masih secara umum digunakan, baik untuk yang bentuknya *funicular* maupun yang tidak.

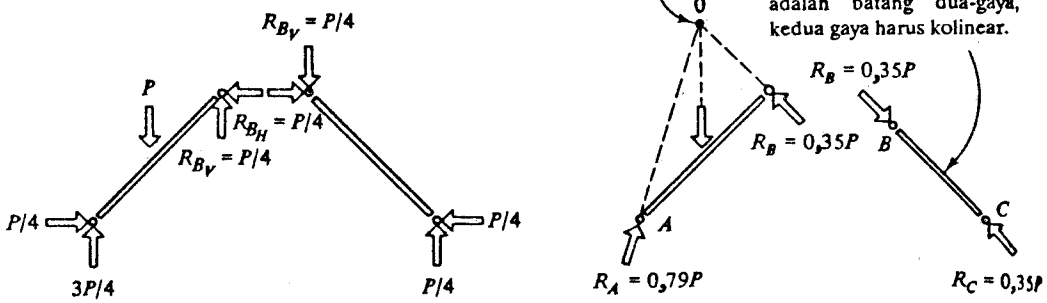
Struktur pelengkung tiga sendi dikembangkan oleh rekayasawan Prancis dan Jerman pada pertengahan abad ke-19, khususnya untuk mengatasi kesulitan perhitungan pada jenis pelengkung sebelumnya (pelengkung jepit). Adanya sendi pada puncak dan fondasi struktur memungkinkan adanya gaya internal maupun gaya vertikal dihitung secara tepat sehingga bentuk *funicular* untuk setiap bagian dapat dengan tepat ditentukan. Karena itulah struktur yang lebih besar dapat dibangun dengan lebih meyakinkan. Galerie des Machines yang sangat terkenal (sebenarnya bernama Palais des Machines di Pameran Paris pada tahun 1889



(a) Struktur dasar

Karena segmen kiri merupa-kan batang tiga-gaya, semua gaya harus bertemu pada satu titik.

Karena segmen kanan adalah batang dua-gaya, kedua gaya harus kolinear.



(b) Diagram benda bebas untuk setiap bagian struktur: komponen-komponen gaya pada titik hubung

(c) Diagram benda bebas setiap bagian: gaya-gaya pada titik hubung

GAMBAR 5-11 Pelengkung tiga sendi: gaya-gaya pada hubungan.

me .an struktur yang terdiri atas sekumpulan pelengkung tiga sendi (lihat Gambar 5-10). Dengan teknik perhitungan yang telah dikembangkan, struktur tiga sendi menjadi jenis struktur yang sangat banyak dipakai (lihat Bab 5.4.3).

Perhatikan struktur pelengkung tiga sendi seperti terlihat pada Gambar 5-11. Jelas bahwa struktur ini tidak dibentuk secara *funicular*. Untuk saat ini hal tersebut tidak menimbulkan konsekuensi apa pun. Apabila diperlukan, pada saatnya nanti bentuknya akan didesain ulang menjadi bentuk funicular.

Perhatikan bahwa perilaku hubungan pada *B* adalah sedemikian rupa sehingga ujung segmen *AB* bebas berotasi pada saat mengalami beban. Ini berarti bahwa segmen *BC* tidak berpartisipasi dalam menahan rotasi ujung *AB*. Ujung-ujung segmen yang saling berhubungan dapat berotasi dengan bebas, tanpa saling mempengaruhi. Hubungan sendi ini tidak dapat menyalurkan momen dari satu segmen ke segmen lain atau, dengan perkataan lain, momen lentur pada titik hubung tersebut adalah nol. Dengan demikian jumlah semua efek rotasional yang timbul terhadap titik hubung tersebut, yang diakibatkan oleh gaya eksternal maupun internal, adalah nol.

Karena beban eksternal bekerja secara langsung pada segmen kiri, maka arah gaya yang disalurkan melalui titik hubung sendi itu tidak harus kolinear dengan segmen tersebut seperti yang biasa terjadi pada rangka batang. Pada contoh berikut ini akan dicari besar dan arah gaya-gaya pada setiap titik hubung dengan meninjau keseimbangan seluruh struktur dulu, kemudian keseimbangan setiap bagian.

CONTOH

Tentukanlah gaya internal yang timbul di setiap titik sendi pada struktur yang terlihat pada Gambar 5-11.

Solusi:

Mula-mula struktur itu diuraikan menjadi dua bagian seperti terlihat pada Gambar 5-11, dan diagram keseimbangan digambar untuk setiap bagian. Gaya-gaya pada titik hubung puncak yang pada kenyataannya merupakan gaya internal pada struktur diperlihatkan sama besar dan berlawanan arah di kedua bagian karena merupakan aksi dari yang satu dan reaksi ke bagian yang lain.

Keseimbangan gaya arah vertikal untuk keseluruhan struktur: $\sum F_y = 0 \quad \uparrow +:$

$$R_{A_y} + R_{C_y} - P = 0$$

Keseimbangan rotasional untuk seluruh struktur terhadap titik A: $\sum M = 0$ ↻:

$$-P\left(\frac{L}{4}\right) + R_{C_y}(L) + R_{C_x}(0) + R_{A_x}(0) = 0$$

jadi $R_{C_y} = \frac{P}{4} \uparrow$

Karena R_{C_y} telah diperoleh, maka R_{A_y} dapat diperoleh dari persamaan $R_{C_y} + R_{A_y} - P = 0$. *Jadi,* $R_{A_y} = \frac{3}{4}P \uparrow$.

Keseimbangan gaya arah horizontal untuk seluruh struktur: $\sum F_x = 0 \quad \rightarrow +$:

$$R_{A_h} - R_{C_h} = 0 \quad \text{atau} \quad R_{A_h} = R_{C_h}$$

Kita tidak dapat memperoleh R_{A_h} dan R_{C_h} dari tinjauan keseimbangan seluruh struktur. Yang dapat ditentukan hanyalah bahwa gaya-gaya tersebut sama besar dan berlawanan arah. Untuk mendapat gaya-gaya tersebut dan gaya-gaya yang ada pada titik hubung puncak B, kita harus meninjau keseimbangan untuk setiap segmen. Kita tinjau dulu segmen sebelah kanan.

Keseimbangan arah vertikal untuk bagian kanan: $\sum F_y = 0 \uparrow +$:

$$R_{C_v} - R_{B_v} = 0 \quad \text{atau} \quad R_{C_v} = R_{B_v}$$

Karena $R_{C_v} = P/4$, maka kita peroleh $R_{B_v} = P/4 \downarrow$.

Keseimbangan rotasional segmen kanan terhadap titik B: $\sum M = 0$ ↻:

$$+\left(\frac{P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) - R_{C_h}\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \quad \text{atau} \quad R_{C_h} = \frac{P}{4} \leftarrow$$

Keseimbangan elemen kanan pada arah hirizontal : $\sum F_x = 0 \quad \rightarrow +$:

$$R_{B_h} - \left(\frac{P}{4}\right) = 0 \quad \text{atau} \quad R_{B_h} = \frac{P}{4} \rightarrow$$

Dengan demikian kita peroleh semua gaya pada titik tumpuan kanan C dan titik hubung B. Gaya-gaya yang diperoleh adalah komponen vertikal dan horizontal dari gaya aktual.

Seperti terlihat apda Gambar 5-11(c), komponen-komponen itu dapat dibuat resultannya. Karena elemen kanan merupakan elemen struktur dua gaya, maka dua gaya yang bekerja pada elemen struktur itu harus kolinear dan berlawanan arah. Untuk memperoleh R_{A_h} (satu-satunya gaya yang belum kita peroleh), kita perlu meninjau keseimbangan segmen kiri struktur.

Keseimbangan pada arah vertikal untuk elemen kiri: $\sum F_y = 0 \quad \uparrow +$:

$$R_{A_v} + R_{B_v} - P = 0$$

Karena R_{A_v} maupun R_{B_v} telah kita ketahui, persamaan ini hanya merupakan kontrol. Dengan demikian, $(3P/4) + (P/4) - P = 0$. Perhatikan bahwa gaya R_{B_v} pada elemen struktur itu sama besar dan berlawanan arah dengan R_{B_v} pada elemen struktur kanan. Hal yang serupa juga berlaku pada R_{B_h}. since

Keseimbangan pada arah horizontal untuk elemen kiri: $\sum F_x = 0 \quad \rightarrow +$:

$$R_{A_h} - R_{B_h} = 0 \quad \text{karena } R_{B_h} = \left(\frac{P}{4}\right),\ R_{A_h} = \frac{P}{4} \rightarrow$$

Komponen vertikal dan horizontal dari R_A telah kita peroleh. Sebagai kontrol dapat kita tuliskan keseimbangan rotasional segmen kiri.

keseimbangan rotasional untuk elemen kiri terhadap titik B: $\sum M = 0$ ↻:

$$-R_{A_v}\left(\frac{L}{2}\right) + P\left(\frac{L}{4}\right) + R_{A_h}\left(\frac{L}{2}\right) = 0$$

atau

$$-\left(\frac{3P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) + P\left(\frac{L}{4}\right) + \left(\frac{P}{4}\right)\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \qquad \textbf{Cocok!}$$

Komponen gaya yang bekerja pada elemen kiri dapat dihitung pula resultannya seperti terlihat pada Gambar 5-11(c). Karena segmen kiri struktur adalah elemen struktur tiga gaya, maka garis kerja semua gaya padanya harus melalui satu titik agar keseimbangan terpenuhi. Pada Gambar 5-11(c) terlihat jelas bahwa garis kerja gaya-gaya tersebut melalui satu titik, yaitu titik 0.

Perlu diperhatikan bahwa gaya-gaya yang diperoleh pada tumpuan dan pada titik hubung puncak hanya dipengaruhi oleh lokasinya di dalam ruang dan oleh besar serta garis kerja beban-beban luar. Bentuk segmen AB maupun BC tidak mempengaruhi gaya-gaya tersebut. Selama segmen-segmen itu kaku dan lokasi titik-titik sendi diketahui, sembarang bentuk segmen (linear, parabola, *funicular*, dan sebagainya) mungkin telah digunakan dan besar gaya-gaya pada titik hubung sendi tidak akan dipengaruhi.

Meskipun gaya-gaya yang diperoleh tidak bergantung pada bentuk segmen kaku, terlihat jelas bahwa bentuk linear yang terlihat pada Gambar 5-11 bukanlah bentuk *funicular* untuk beban eksternal karena beban itu menghasilkan lenturan pada elemen struktur sebelah kiri.

Ketidakbergantungan gaya-gaya pada titik sendi-sendi pada pelengkung tiga sendi terhadap bentuk segmen merupakan konsep penting dan merupakan dasar untuk proses desain. Perhatikan ketiga kondisi pembebanan seperti terlihat pada Gambar 5-12, 5-13, dan 5-14. Anggaplah bahwa kita akan menentukan bentuk struktur setiap segmen yang akan digunakan pada elemen struktur AB dan BC sedemikian rupa sehingga momen lentur dapat minimum atau bahkan dihilangkan sama sekali.

Karena struktur-struktur tersebut statis tertentu, kita dapat menentukan gaya-gaya pada titik tumpuan dan pada titik hubung sendi dengan menggunakan metode yang telah diuraikan di atas tanpa harus mengetahui bentuk struktur yang sebenarnya (kita anggap berat sendiri struktur dapat diabaikan, dan segmen-segmen tersebut kaku). Komponen gaya vertikal dan horizontal kita tentukan dengan menggunakan perhitungan keseimbangan seperti terlihat pada Gambar 5-12(b), 5-13(b), dan 5-14(b).

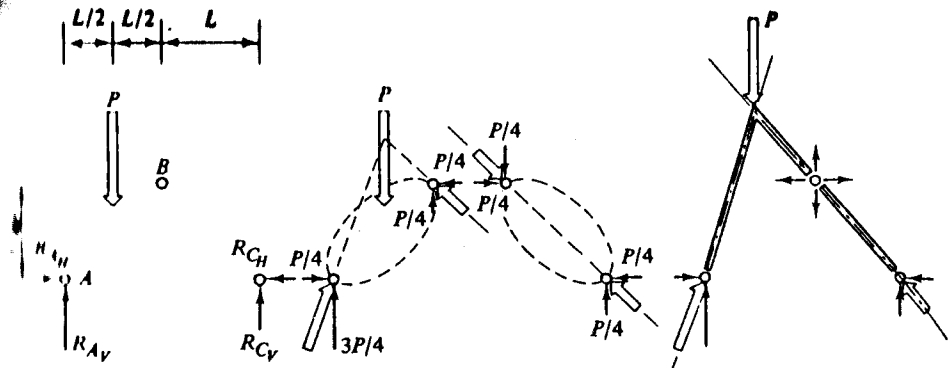
Dengan melakukan analisis seluruh sistem gaya yang bekerja pada setiap segmen pada struktur-struktur tersebut, kita dapat memberi bentuk setiap segmen sedemikian hingga momen lenturnya minimum. Untuk struktur pada Gambar 5-13, perhatikan segmen kaku dari B ke C. Jelas bahwa gaya-gaya yang bekerja

pada segmen itu hanya pada titik-titik ujungnya. Dengan demikian, segmen ini adalah elemen struktur dua gaya. Agar segmen tersebut seimbang, gaya-gaya ini harus kolinear, sama besar, dan berlawanan arah. Nyata pula bahwa apabila tujuan kita adalah membentuk segmen sedemikian rupa sehingga pada segmen itu hanya ada gaya tekan (tidak ada momen lentur), maka segmen tersebut harus berupa garis lurus yang berimpit dengan garis kerja gaya pada segmen itu. Seperti terlihat pada Gambar 5-12(f), momen lentur akan timbul kalau bentuk segmen ini tidak linear.

Jalan pikiran yang sama dapat diterapkan pada segmen kiri. Segmen itu adalah elemen struktur tiga gaya. Dengan demikian, semua gaya harus bertemu pada satu titik agar segmennya berada dalam keseimbangan. Apabila segmen ini segaris dengan garis kerja ketiga gaya, maka segmen ini hanya akan mengalami gaya aksial tekan. Perhatikan bahwa gaya-gaya reaksi dapat menentukan bentuk struktur pada titik tumpuan apabila elemen struktur itu akan dijadikan elemen struktur aksial saja [lihat Gambar 5-12(d)].

Gambar 5-13 mengilustrasikan analisis serupa pada struktur yang dibebani merata pada bagian kiri. Gaya-gaya pada titik sendi ditentukan terlebih dulu. Segmen kanan diberi bentuk seperti pada struktur yang telah kita bahas sebelum ini. Untuk segmen kiri masalahnya agak lebih rumit. Perhatikan bahwa apabila beban terbagi rata kita pandang dapat digantikan dengan beban terpusat yang secara statis ekuivalen dengan beban terbagi rata, maka elemen struktur tersebut berupa elemen tiga gaya di mana garis kerja semua gaya bertemu pada satu titik seperti pada contoh sebelum ini. Akan tetapi, pada kenyataannya bebannya terbagi rata. Untuk beban ini jelas bahwa struktur harus diberi bentuk sedemikian rupa sehingga elemen struktur itu hanya mengalami tekan. Arah-arah reaksi menentukan bentuk struktur pada titik tumpuan, begitu pula arah gaya pada titik hubung sendi menentukan bentuk struktur pada titik hubung tersebut. Bagaimana halnya dengan bentuk struktur di luar titik-titik tersebut? Untuk saat ini, dengan metode yang telah kita pelajari, tidak ada cara untuk menentukan bentuknya secara eksak. Sekalipun demikian, dapat kita asumsikan bahwa bentuknya akan berupa kurva kontinu antara titik-titik yang telah diketahui seperti terlihat pada Gambar 5-13(e). Dasar asumsi ini dibahas pada Bab 1.5 yang menyatakan bahwa struktur *funicular* mempunyai bentuk yang dapat ditentukan dengan meninjau bentuk kabel yang berdeformasi pada beban yang sama. Beban kontinu menghasilkan kurva kontinu pula. Bentuk kurva kontinu ini dapat ditentukan dengan cara inversi dari kabel yang dibebani sama. Struktur yang diperoleh dengan cara demikian serupa dengan contoh sebelum ini, hanya sekarang berbentuk lengkungan, tidak tajam.

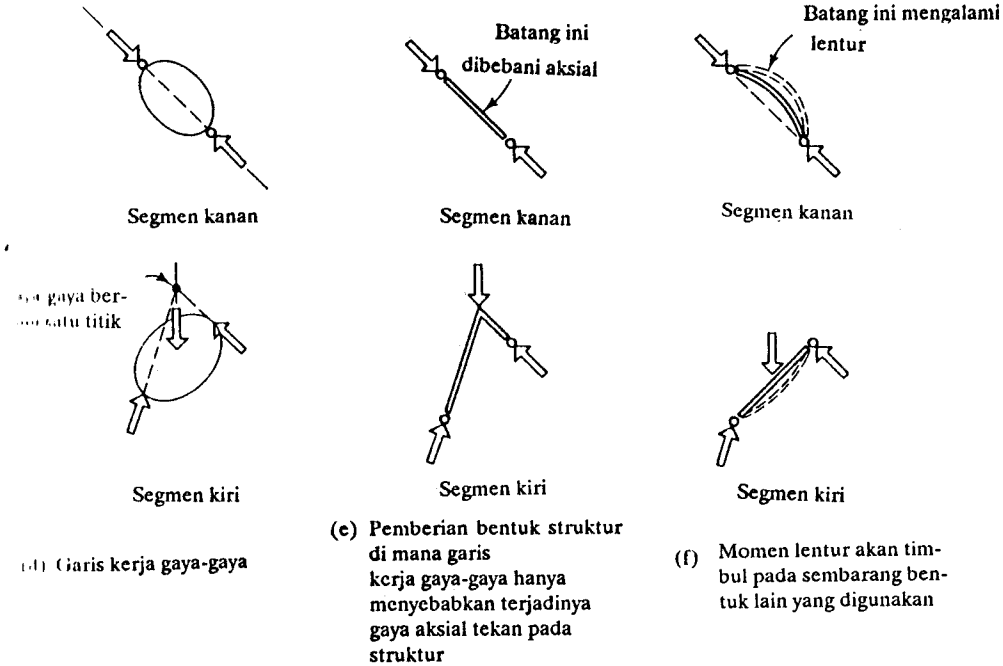
Contoh ketiga yang diperlihatkan pada Gambar 5-14 adalah untuk kasus yang pembebanannya merata di seluruh panjang struktur. Gaya-gaya pada titik hubung juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan keseimbangan. Perhatikan bahwa gaya resultan pada titik hubung puncak (titik B) mempunyai arah horizontal karena tidak mempunyai komponen vertikal. Dengan memperhatikan segmen kanan, terbukti bahwa segmen ini merupakan elemen struktur tiga gaya apabila beban terbagi rata diganti secara konseptual dengan gaya terpusat ekuivalennya. Seperti sebelumnya, gaya-gaya tersebut harus bertemu pada satu



(a) Beban dan lokasi ketiga sendi

(b) Gaya-gaya pada titik hubung

(c) Bentuk *funicular*

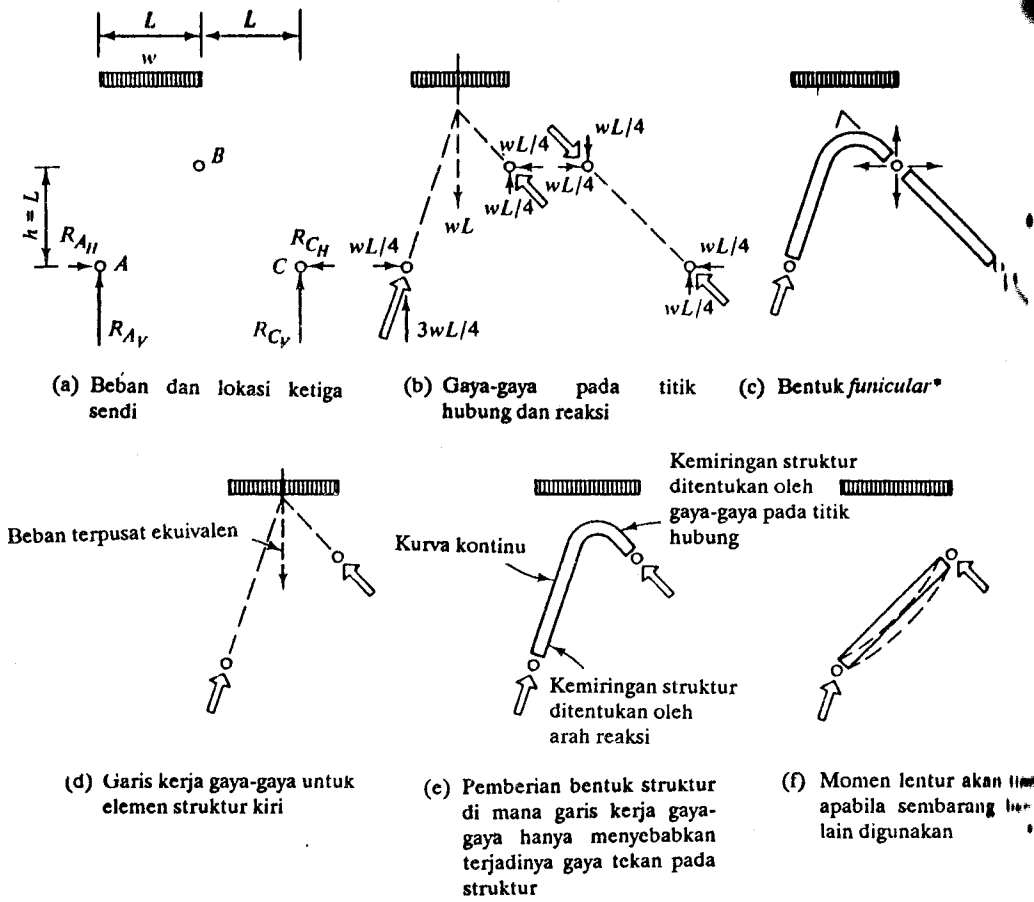


(d) Garis kerja gaya-gaya

(e) Pemberian bentuk struktur di mana garis kerja gaya-gaya hanya menyebabkan terjadinya gaya aksial tekan pada struktur

(f) Momen lentur akan timbul pada sembarang bentuk lain yang digunakan

Gambar 5-12 Pembentukan pelengkung tiga sendi untuk beban-beban terpusat.



(a) Beban dan lokasi ketiga sendi

(b) Gaya-gaya pada titik hubung dan reaksi

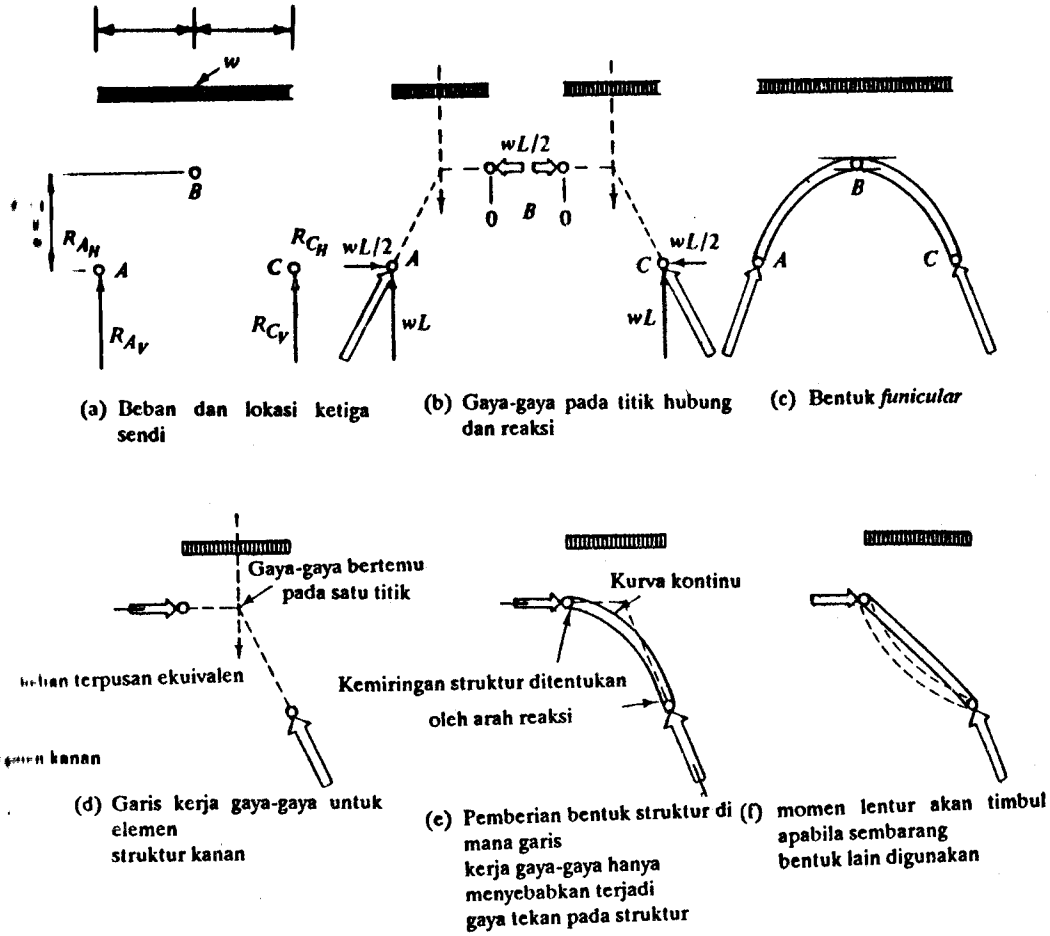
(c) Bentuk *funicular*

(d) Garis kerja gaya-gaya untuk elemen struktur kiri

(e) Pemberian bentuk struktur di mana garis kerja gaya-gaya hanya menyebabkan terjadinya gaya tekan pada struktur

(f) Momen lentur akan timbul apabila sembarang bentuk lain digunakan

Gambar 5-13 Pembentukan pelengkung tiga sendi untuk beban terbagi rata sebagian.



(a) Beban dan lokasi ketiga sendi

(b) Gaya-gaya pada titik hubung dan reaksi

(c) Bentuk *funicular*

(d) Garis kerja gaya-gaya untuk elemen struktur kanan

(e) Pemberian bentuk struktur di mana garis kerja gaya-gaya hanya menyebabkan terjadi gaya tekan pada struktur

(f) momen lentur akan timbul apabila sembarang bentuk lain digunakan

GAMBAR 5-14 Pemberian bentuk pelengkung tiga sendi untuk beban terbagi rata penuh.

titik. Arah gaya pada titik puncak dan tumpuan juga ditentukan oleh bentuk struktur pada titik-titik itu apabila struktur dikehendaki hanya mengalami gaya tekan. Dengan menganggap bahwa kurva struktur adalah kontinu dan halus di antara titik-titik tersebut, bentuknya akan seperti terlihat pada Gambar 5-14(e). Seperti sebelumnya, kita tidak mungkin mendapat bentuk persamaan kurva itu hanya dengan menggunakan analisis yang diuraikan di sini.

Meskipun demikian, analogi kabel terbalik cukup berguna sebagai alat untuk membayangkan bentuk elemen struktur pelengkung. Segmen kiri tentu saja serupa dengan segmen kanan. Bentuk yang diperoleh adalah seperti terlihat pada Gambar 5-14(c). Bentuk ini merupakan parabolik dengan garis singgung terhadap kurva ditentukan oleh arah reaksi. Bentuk ini adalah bentuk yang sangat umum digunakan sebagai struktur *pelengkung*.

Setiap bentuk struktur yang digambarkan hanya mengalami gaya aksial tekan, tidak mengalami momen lentur. Kita dapat melakukan manipulasi terhadap bentuk-bentuk tersebut. Meskipun bentuk struktur pada mulanya diperoleh dengan meninjau titik hubung puncak, titik *B* (lihat Gambar 5-12), lokasi aktual titik ini dapat di mana saja pada bentuk akhir tanpa mempengaruhi bentuk struktur dan besar serta arah gaya-gaya pada titik tumpuan. Hal ini dapat dilakukan dengan perhitungan keseimbangan. Seluruh struktur dibayangkan dahulu mempunyai elemen-elemen bersendi, dan konfigurasinya secara teoretis akan stabil terhadap bahan tersebut. Hal ini tentu saja sama dengan analogi *sphere* (tumpukan bola) yang telah diperlihatkan pada Gambar 2-4. Pada kenyataannya, struktur imajiner itu tidak cocok digunakan karena ketidakstabilannya terhadap beban lain. Sekalipun demikian, pendekatan ini masih sangat berguna untuk mengimplikasikan

penggunaan jenis struktur ini. Cara lain untuk memodelkan adalah dengan meng anggap struktur tersebut sebagai tumpukan blok. Selama elemen blok itu ditumpu dengan cara khusus (dengan menganggap beratnya dapat diabaikan), akan terbentu struktur yang stabil terhadap beban yang khusus pula, tidak peduli apakah blo itu disatukan dengan adukan semen ataukah tidak. Struktur yang memikul beba terbagi rata penuh, misalnya, dapat dibuat dengan menumpuk blok secara kh (kontinu) dan akan stabil terhadap beban tersebut. Jelas bahwa apabila beban i berubah, struktur akan tidak stabil dan dapat terjadi keruntuhan padanya. Semu bentuk yang diperlihatkan adalah bentuk-bentuk khusus pelengkung apabil struktur itu dikehendaki hanya mengalami gaya tekan. Cara berpikir yang bena mengenai analogi tumpukan bola maupun tumpukan blok adalah bahwa ada *hubungan unik antara beban dan struktur apabila kriteria yang digunakan dalam desain struktur tersebut ialah bahwa tidak ada momen lentur padanya.*

Perlu diingat bahwa pada struktur yang dianalisis, efek penentuan titik sendi (titik *B*) adalah untuk menetapkan lokasi pada struktur yang berdasarkan definisi, tidak dapat memberikan tahanan terhadap momen lentur sama sekali. Hal ini berarti bahwa setiap respons struktural *funicular harus* melalui titik *B* tidak peduli di mana lokasi tersebut berada.

Berikut ini akan dibahas lebih lanjut masalah pemberian bentuk struktur. Pada bab itu akan dibahas cara-cara menentukan kurva yang menghubungkan titik-titik tumpuan pada struktur yang dibebani, yang diketahui berlaku secara *funicular.*

5.3.2 Pelengkung Funicular dan Kabel: Beban Terpusat

Pada bagian ini dibahas analisis struktur yang diketahui berbentuk *funicular* (misalnya kabel). Kabel dapat dipandang sebagai sederetan kontinu elemen diskret yang saling dihubungkan dengan hubungan sendi – rantai adalah contoh nyata hal ini. Hubungan demikian mempunyai sifat tidak mampu meneruskan momen lentur (internal) dari satu elemen ke elemen lain. Karena itulah jumlah efek rotasional terhadap *sembarang* lokasi yang dihasilkan oleh beban eksternal dan gaya internal harus sama dengan nol. Pada pelengkung tiga sendi yang mempunyai bentuk tali *funicular,* nilai momen sama dengan nol ini hanya berlaku pada ketiga titik sendi. Pada kabel, hal ini benar untuk semua lokasi. Uraian di sini dapat digunakan untuk menentukan bentuk eksak elemen struktur dan gaya-gaya di dalamnya.

Hal lain yang perlu diperhatikan ialah apa yang telah diuraikan pada Bab 3 dan 4 bahwa fungsi suatu struktur antara lain adalah pemikul momen dan gaya yang ditimbulkan oleh beban eksternal. Pada kabel maupun pelengkung *funicular* geser eksternal pada setiap potongan diimbangi oleh gaya geser tahanan internal yang diberikan oleh komponen vertikal dari gaya aksial kabel atau pelengkung. Begitu pula halnya dengan momen lentur eksternal. Momen ini diimbangi oleh momen lentur tahanan internal yang merupakan kopel dari komponen horizontal gaya aksial pada elemen struktur *funicular* dan reaksi horizontal. Gaya horizontal yang disebut terakhir ini dapat merupakan gaya pada fondasi atau gaya internal pada batang tarik atau tekan (apabila batang ini ada).

Contoh berikut ini mengilustrasikan bagaimana geometri kabel dan gaya internal ditentukan dengan menerapkan prinsip-prinsip yang telah disebutkan di atas.

CONTOH

Gambar 5-15 memperlihatkan struktur kabel yang memikul dua beban. Anggap bahwa struktur itu berdeformasi seperti tergambar dan mempunyai tinggi maksimum pada titik beban pertama. Struktur ini juga mempunyai tinggi kritis pada titik beban kedua. Tinggi titik yang disebut terakhir ini belum diketahui, tetapi harus mempunyai harga yang bergantung pada tinggi struktur pada titik pertama.

Solusi:

Langkah pertama analisis ialah menentukan reaksi-reaksi pada ujung-ujung elemen struktur. Reaksi vertikal dapat diperoleh secara langsung dengan meninjau keseimbangan momen seluruh struktur terhadap salah satu titik. Reaksi horizontal dapat diperoleh dengan membuat potongan yang melalui titik yang diketahui tingginya, dan meninjau keseimbangan bagian kiri atau kanan struktur. Dengan demikian:

Reaksi vertikal:

$$\sum M_A = 0 \quad \circlearrowright: \qquad -15(10) - 30(5) + 45R_{B_V} = 0$$

$$R_{B_V} = 6{,}7$$

$$\sum F_Y = 0 \quad +\uparrow: \qquad -10 - 5 + R_{A_V} + R_{B_V} = 0$$

$$R_{A_V} = 8{,}3$$

Reaksi horizontal:
Kita buat potongan struktur secara vertikal sedikit di kanan lokasi tinggi maksimum, dan kita tinjau keseimbangan bagian kiri struktur:

$$\sum M_C = 0 \quad \circlearrowright: \qquad -15(8{,}3) + 10(R_{A_H}) = 0$$

$$R_{A_H} = 12{,}5$$

Untuk seluruh struktur:

$$\sum F_X = 0 \quad \overset{+}{\rightarrow}: \qquad -R_{A_H} + R_{B_H} = 0$$

$$R_{B_H} = 12{,}5$$

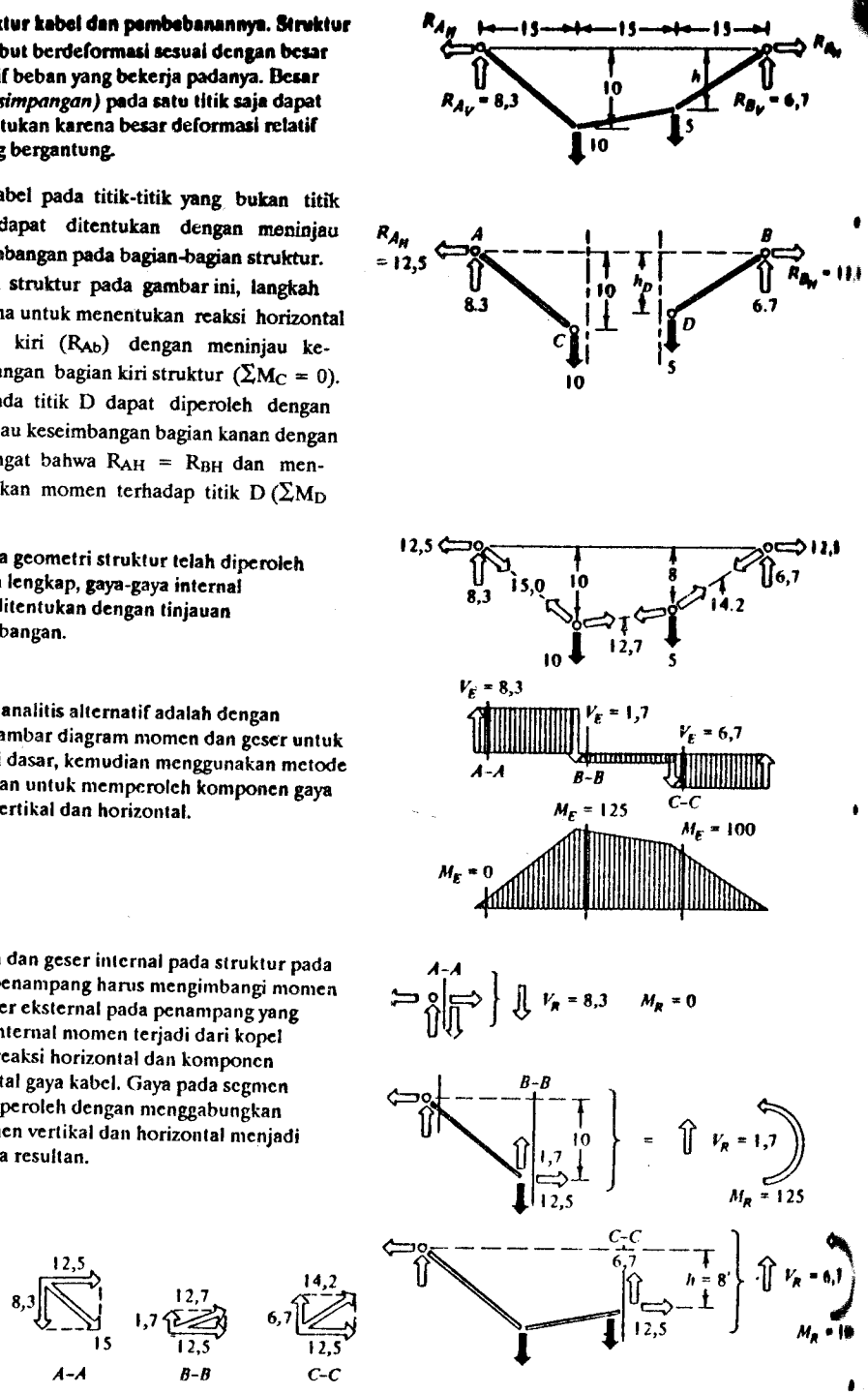
(a) Struktur kabel dan pembebanannya. Struktur tersebut berdeformasi sesuai dengan besar relatif beban yang bekerja padanya. Besar *sag (simpangan)* pada satu titik saja dapat ditentukan karena besar deformasi relatif saling bergantung.

(b) Sag kabel pada titik-titik yang bukan titik tadi dapat ditentukan dengan meninjau keseimbangan pada bagian-bagian struktur. Untuk struktur pada gambar ini, langkah pertama untuk menentukan reaksi horizontal bagian kiri (R_{Ab}) dengan meninjau keseimbangan bagian kiri struktur ($\Sigma M_C = 0$). *Sag* pada titik D dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan bagian kanan dengan mengingat bahwa $R_{AH} = R_{BH}$ dan menjumlahkan momen terhadap titik D ($\Sigma M_D = 0$)

(c) Apabila geometri struktur telah diperoleh dengan lengkap, gaya-gaya internal dapat ditentukan dengan tinjauan keseimbangan.

(d) Proses analitis alternatif adalah dengan menggambar diagram momen dan geser untuk kondisi dasar, kemudian menggunakan metode potongan untuk memperoleh komponen gaya kabel vertikal dan horizontal.

(e) Momen dan geser internal pada struktur pada setiap penampang harus mengimbangi momen dan geser eksternal pada penampang yang sama. Internal momen terjadi dari kopel antara reaksi horizontal dan komponen horizontal gaya kabel. Gaya pada segmen kabel diperoleh dengan menggabungkan komponen vertikal dan horizontal menjadi satu gaya resultan.



GAMBAR 5-15 Analisis kabel yang memikul beban terpusat.

Tinggi struktur pada titik D:
Kita buat potongan vertikal sedikit di kiri titik *D*, dan kita tinjau keseimbangan bagian kanan struktur. Sebutlah h_D sebagai tinggi struktur pada titik *D*. Dengan demikian:

$$\Sigma M_D = 0 \quad \circlearrowleft:$$

$$-h_D(12,5) + 15(6,7) = 0$$

$$h_D = 8,3$$

Perhatikan bahwa pada titik *D* hanya tinggi sebesar inilah yang memenuhi keseimbangan rotasional.

Gaya-gaya kabel:
Gaya-gaya pada setiap segmen kabel dapat diperoleh dengan menggunakan metode keseimbangan titik hubung. Hasil proses ini diperlihatkan dalam Gambar 5-15(c). Perlu diperhatikan bahwa besar gaya kabel untuk setiap segmen berbeda-beda. Kabel *bukanlah* struktur yang bergaya konstan.

Sesudah reaksi vertikal diperoleh, kita dapat menggunakan alternatif metode analisis untuk struktur ini dengan menggambarkan dulu diagram geser dan momen untuk kondisi beban eksternal untuk kemudian kita imbangi dengan cara *metode potongan.*

Reaksi horizontal:
Reaksi horizontal dapat diperoleh dengan mengingat bahwa struktur harus dapat memberikan momen internal yang sama besar dan berlawanan arah dengan momen eksternal pada setiap titik. Momen internal ini diberikan oleh kopel antara reaksi horizontal dan komponen horizontal gaya kabel. Perhatikan titik *C:*

$10\,R_{A_h}$	$= 125$	atau $R_{A_h} = 12,5$
momen tahanan internal	momen eksternal (lihat diagram momen)	

Hal ini tentu saja merupakan proses yang sama dengan yang telah disebutkan terdahulu, tetapi secara konsep berbeda cara pandang.

Tinggi struktur pada titik D:
Dengan cara seperti sebelum ini:

$h_D\,(12,5)$	$= 100$	atau $h_D = 8,3$
momen tahanan internal	momen eksternal'	

Gaya kabel:

Kita buat potongan-potongan sedikit di kanan titik-titik kritis, dan kita tinjau keseimbangan bagian kiri [lihat Gambar 5-11(e)]. Perhatikan bahwa pada setiap kasus, tahanan geser internalnya mengimbangi gaya geser eksternal. Gaya tahanan geser internal ini adalah komponen vertikal gaya kabel. Gaya vertikal dan horizontal merupakan komponen-komponen dari gaya aktual pada kabel.

Metode kedua pada contoh di atas sangat berguna untuk meninjau secara konseptual bagaimana kabel atau pelengkung memberikan mekanisme memikul momen dan geser akibat beban eksternal. Terlihat pula bahwa reaksi dan gaya internal bergantung pada tinggi struktur. Dengan membuat tinggi maksimum dua kali misalnya reaksi horizontal akan menjadi setengahnya dan gaya kabel akan berkurang. Kombinasi tinggi kabel dan gaya-gayanya juga tetap akan memenuhi keseimbangan momen dan geser yang telah disebutkan di atas.

5.3.3 Pelengkung Kabel dan Funicular: Beban Terbagi Rata

Kabel atau pelengkung yang memikul beban terbagi rata dapat dianalisis dengan menggunakan cara-cara yang telah disebutkan untuk beban terpusat. Akan tetapi karena bebannya berbeda, maka perlu ada modifikasi sedikit pada metode potongan dalam analisis akibat beban terbagi rata.

Perhatikan kabel yang terlihat pada Gambar 5-16. Anggap bahwa simpangan kabel maksimum adalah h_{maks}. Langkah pertama adalah menghitung reaksi vertikal dengan meninjau keseimbangan seluruh struktur. Langkah berikutnya adalah menghitung reaksi horizontal, memperoleh bentuk kurva *funicular,* dan menentukan gaya internal pada kabel.

Solusi:

Reaksi vertikal:

Secara langsung kita peroleh $R_{A_V} = R_{B_V} = \frac{wL}{2}$

Reaksi horizontal:

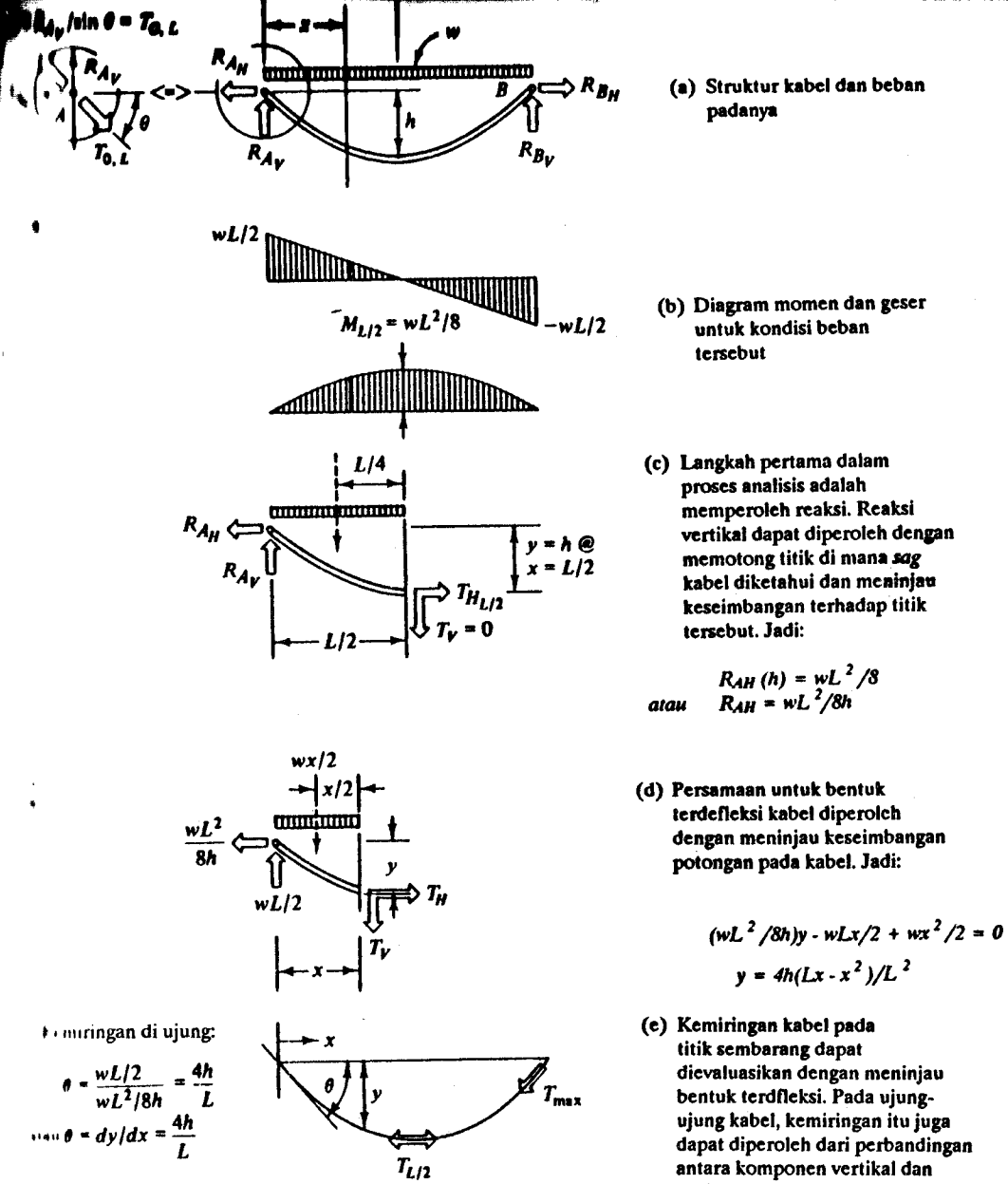
Potonglah struktur di tengah bentang (pada lokasi yang diketahui simpangannya) dan perhatikan keseimbangan bagian kiri struktur:

$$\sum M_{L/2} = 0:$$

$$+R_{A_H}h_{max} - \left(\frac{wL}{2}\right)\left(\frac{L}{2}\right) + \left(\frac{wL}{2}\right)\left(\frac{L}{4}\right) = 0$$

atau

$$R_{A_H} = \frac{wL^2}{8h_{max}}$$



(a) Struktur kabel dan beban padanya

(b) Diagram momen dan geser untuk kondisi beban tersebut

(c) Langkah pertama dalam proses analisis adalah memperoleh reaksi. Reaksi vertikal dapat diperoleh dengan memotong titik di mana *sag* kabel diketahui dan meninjau keseimbangan terhadap titik tersebut. Jadi:

$$R_{AH}(h) = wL^2/8$$
atau $$R_{AH} = wL^2/8h$$

(d) Persamaan untuk bentuk terdefleksi kabel diperoleh dengan meninjau keseimbangan potongan pada kabel. Jadi:

$$(wL^2/8h)y - wLx/2 + wx^2/2 = 0$$
$$y = 4h(Lx - x^2)/L^2$$

(e) Kemiringan kabel pada titik sembarang dapat dievaluasikan dengan meninjau bentuk terdfleksi. Pada ujung-ujung kabel, kemiringan itu juga dapat diperoleh dari perbandingan antara komponen vertikal dan horizontal dari reaksi. Gaya kabel maksimum adalah resultan gaya-gaya tersebut. Gaya kabel di tengah bentang lebih kecil dan sama besar dengan gaya horizontal pada ujung $T_{L/2} = wL^2/8h$.

GAMBAR 5-16 Analisis kabel yang memikul beban terdistribusi rata secara horizontal.

Alternatif lain adalah dengan menggunakan diagram geser dan momen secara langsung:

$$\underbrace{R_{A_H} h_{max}}_{\text{internal resisting moment}} = \underbrace{\frac{wL^2}{8}}_{\text{external applied moment}} \qquad \therefore R_{A_H} = \frac{wL^2}{8h_{max}}$$

Bentuk kabel:
Bentuk kabel dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan potongan lain pada struktur. Perhatikan potongan sejauh x dari ujung kiri. Misalkan y adalah tinggi kabel pada titik itu.

$\sum M_x = 0$:

$$\left(\frac{wL^2}{8h_{max}}\right)(y) - \left(\frac{wL}{2}\right)(x) + wx\left(\frac{x}{2}\right) = 0$$

$$y = \frac{4h_{max}(Lx - x^2)}{L^2}$$

Alternatif lain, dengan menyamakan momen tahanan internal dan momen eksternal:

$$\left(\frac{wL^2}{8h_{max}}\right)y = \left(\frac{wL}{2}\right)x - (wx)\left(\frac{x}{2}\right)$$

$$y = \frac{4h_{max}(Lx - x^2)}{L^2}$$

Persamaan ini jelas merupakan bentuk parabola. Nilai mutlak kemiringan pada titik-titik ujung diberikan oleh:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0,\,x=L} = \theta_{x,L} = \frac{4h_{max}}{L}$$

Kemiringan ini dapat pula diperoleh dengan meninjau perbandingan antara reaksi vertikal dan horizontal:

$$\theta = \frac{wL/2}{wL^2/8h_{max}} = \frac{4h_{max}}{L}$$

Gaya kabel:
Karena kemiringan kabel adalah nol pada titik tengah bentang di mana gaya geser internal dan eksternal juga nol, maka gaya kabel pada titik tersebut akan sama dengan reaksi horizontal dengan meninjau keseimbangan horizontal bagian kiri atau kanan struktur. Dengan demikian:

$$T_{L/2} = \frac{wL^2}{8h_{max}}$$

Gaya kabel pada kedua ujung dapat dengan mudah diperoleh dengan meninjau keseimbangan titik:

$\sum F_x = 0$:

$$T_{0,L}\cos\theta = \frac{wL^2}{8h_{max}}$$

di mana $4h_{max}/L$ dan $\cos\theta$ by $1/\sqrt{1 + 16h_{max}^2/L}$. Dengan demikian:

$$T_{0,L} = \frac{wL^2}{8h_{max}}\sqrt{1 + 16h_{max}^2/L^2}$$

atau juga

$$\begin{aligned} T_{0,L} &= \sqrt{(R_{A_H})^2 + (R_{A_V})^2} \\ &= R_{A_H}\sqrt{1 + (R_{A_V}/R_{A_H})^2} \\ &= \frac{wL^2}{8h_{max}}\sqrt{1 + 16h_{max}^2/L^2} \end{aligned}$$

Dengan demikian, gaya pada kabel pada ujung-ujungnya lebih besar daripada di tengah bentang.

CONTOH

Diketahui sederetan kabel yang mempunyai bentang 15 ft (4,6 m) pada bentang tengah, 100 ft (30,5 m) di antara *abutments*, dan memikul beban hidup 50 lb/ft^2 (2394 N/m^2). Setiap kabel mempunyai *sag* (simpangan) maksimum 20 ft (6,3 m). Anggap bahwa beban mati di seluruh struktur adalah 50 lb/ft^2 (2394 N/m^2). Juga anggap bahwa beban mati maupun beban hidupnya terdistribusi secara horizontal. Carilah diameter minimum kabel yang diperlukan apabila diketahui tegangan izin kabel adalah 75000 lb/in.^{2} (517 N/mm^2).

Solusi:

Reaksi-reaksi:

$$\text{vertikal} = R_{A_V} = \frac{wL}{2} = \frac{[(50 + 50)\text{ lb/ft}^2](15\text{ ft})(100\text{ ft})}{2} = 75.000\text{ lb}$$

$$= \frac{[(2394 + 2394)\text{ N/m}^2](4{,}6\text{ m})(30{,}5\text{ m})}{2} = 334\text{ kN}$$

$$\text{horizontal} = R_{A_H} = \frac{wL^2}{8h} = \frac{[(50 + 50)\text{ lb/ft}^2](15\text{ ft})(100\text{ ft})^2}{8(20\text{ ft})} = 93.750\text{ lb}$$

$$= \frac{[(2394 + 2394)\text{ N/m}^2](4{,}6\text{ m})(30{,}5\text{ m})^2}{8(6.1\text{ m})} = 417\text{ kN}$$

Gaya kabel maksimum (pada ujung-ujung):

$$T = \sqrt{R_{A_V}^2 + R_{A_H}^2} = (75.000^2 + 93.750^2)^{1/2} = 120.000\text{ lb}$$

$$= (334^2 + 417^2)^{1/2} = 534\text{ kN}$$

Alternatif lain:

$$T = R_{A_H}\sqrt{1 + 16h^2/L^2}$$

$$= 93.750 \text{ lb}\left[1 + 16\left(\frac{20^2}{100^2}\right)\right]^{1/2} = 120.000 \text{ lb}$$

$$= 417 \text{ kN}\left[1 + 16\left(\frac{6,1^2}{30,5^2}\right)\right]^{1/2} = 534 \text{ kN}$$

Diameter kabel:

$$A = \frac{T}{f_{\text{allowable}}} = \frac{120.000}{75.000} = 1,60 \text{ in.}^2$$

$$= \frac{534.000 \text{ N}}{517 \text{ N/mm}^2} = 1033 \text{ mm}^2$$

Kita dapat menggunakan jalinan beberapa kawat yang masing-masing berdiameter lebih kecil hingga membentuk kabel yang diameter totalnya memenuhi syarat luas tersebut. Jumlah luas kotor diameter total tidak sama dengan jumlah luas neto setiap penampang kawat. Luas kabel yang diperhitungkan adalah sekitar $\frac{2}{3}$ dari luas kotor. Dengan demikian, luas kotor kabel yang diperlukan untuk contoh ini adalah $(\frac{3}{2})$ (1,60) = 2,4 in.^{2} atau $(\frac{3}{2})$ (1033) = 1550 mm^2. Diameter yang memberikan luas sebesar ini adalah $1\frac{3}{4}$ in. atau 45 mm.

5.3.4 Persamaan Funicular Umum

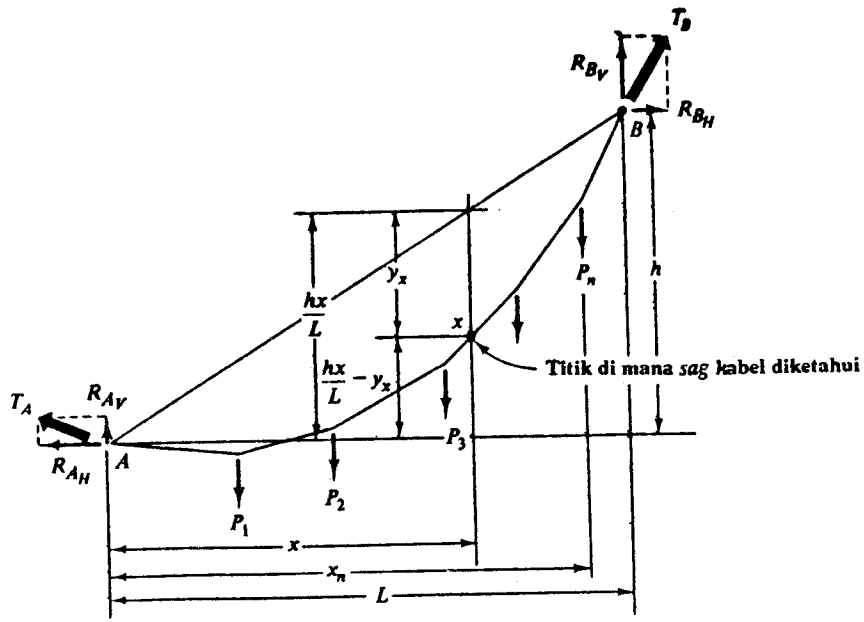
Dalam analisis kabel, kita dapat menggunakan cara yang lebih umum daripada yang telah dijelaskan sebelum ini. Cara umum ini dapat diterapkan pada struktur yang lebih kompleks, misalnya yang tidak dibebani secara simetris atau tumpuan kabel tidak terletak pada level sama.

Perhatikan kabel pada Gambar 5-17. Seperti sebelum ini, langkah pertama dalam proses analisis adalah memperoleh reaksi. Apabila ΣM_{B_E} adalah jumlah semua momen rotasional terhadap titik B akibat semua beban eksternal [yaitu $P_n(L - x_n) + P_{n-1}(L - x_{n-1}) + \ldots\ldots$], maka ekspresi keseimbangan momen untuk seluruh kabel terhadap titik B adalah:

$$\sum M_B = 0:$$

$$-R_{A_H}(h) - R_{A_V}(L) + \sum M_{B_E} = 0$$

$$R_{A_V} = \frac{\sum M_{B_E}}{L} - \frac{R_{A_H}(h)}{L}$$



GAMBAR 5-17 Kabel yang mempunyai tumpuan yang berbeda level.

Ekspresi ini tidak dapat dipecahkan secara langsung karena R_{A_v} dan R_{A_h} belum diketahui. Langkah berikutnya adalah membuat potongan pada titik x pada struktur di mana *sag* (simpangan) *kabel* diketahui dan meninjau keseimbangan momen di bagian kiri kabel. Misalkan ΣM_{x_E} adalah jumlah momen eksternal akibat beban-beban di kiri titik x. Perhatikan bahwa lengan momen untuk gaya R_{A_h} adalah $(hx/L - y_x)$ di mana y_x adalah *sag* kabel dari garis yang menghubungkan kedua titik ujung kabel. Dengan demikian ekspresi momen adalah:

$$\sum M_x = 0:$$

$$-R_{A_H}(hx/L - y_x) - R_{A_V}x + \sum M_{x_E} = 0$$

Dengan menyubstitusikan R_{A_v} dari atas kita peroleh:

$$R_{A_H}(y_x) = \left(\frac{x}{L}\right)\sum M_{B_E} - \sum M_{x_E}$$

Apabila y_x telah diketahui, maka R_{A_h} dapat ditentukan. Apabila R_{A_h} telah diketahui, maka dapat kita gunakan untuk mencari *sag* kabel pada titik-titik x lainnya. Gaya kabel dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan dengan cara serupa dengan yang telah disebutkan.

5.3.5 Panjang Pelengkung atau Kabel

Kita sering kali perlu mengetahui panjang kabel atau pelengkung untuk bentang dan *sag* yang diketahui. Panjang ini dapat selalu dihitung dengan meninjau ekspresi dalam bentuk kabel terdeformasi. Untuk kabel yang *dibebani terbagi rata* dan mempunyai titik tumpuan selevel, misalkan L_{total} adalah panjang total kabel, L_h adalah bentang dan h adalah *sag* maksimum. Panjang total kabel dapat dibuktikan mendekati nilai:

$$L_{total} = L_h(1 + \tfrac{8}{3}h^2/L_h^2 - \tfrac{32}{5}h^4/L_h^4)$$

Untuk memperolehnya, juga untuk memperoleh ekspresi lain mengenai perpanjangan kabel, para pembaca dapat mempelajari referensi lainnya.[1]

5.4 DESAIN PELENGKUNG DAN KABEL

Bab 5.4 ini membahas desain kabel dan pelengkung dengan meninjau terlebih dahulu hal-hal yang sama antara kedua jenis struktur tersebut, kemudian membahas hal-hal khusus pada struktur masing-masing.

5.4.1 Sag Kabel atau Tinggi Pelengkung

Salah satu dari variabel-variabel desain yang penting pada pelengkung dan kabel adalah tinggi maksimum struktur. Dari Bab 5.2 telah kita ketahui bahwa gaya-gaya pada struktur tersebut, jadi juga ukurannya, sangat bergantung pada besar sag (simpangan) atau tinggi relatif terhadap bentang struktur. Sebagai contoh, komponen horizontal dari gaya tersebut pada kabel yang dibebani terdistribusi merata dan mempunyai level ujung sama adalah $T_h = wL^2/8h_{maks}$ di mana h_{maks} adalah sag maksimum yang ada. Tentu saja, apabila *sag* maksimum menjadi dua kali, maka gaya T_h akan menjadi setengahnya. Secara umum, apabila h_{maks} dijadikan lebih kecil, gaya kabel akan menjadi lebih besar, begitu pula sebaliknya. Jelas bahwa kita tidak mungkin mempunyai *sag* sama dengan nol karena hal ini akan menjadikan gaya kabel tak hingga besarnya dan membutuhkan luas penampang melintang kabel tak hingga besarnya.

Penentuan *sag* pada kabel atau tinggi pada pelengkung merupakan masalah optimisasi. Apabila h_{maks} bertambah, gaya pada kabel berkurang sehingga luas penampang yang diperlukan juga berkurang. Akan tetapi, panjang kabel secara simultan bertambah. Jelas bahwa kabel yang panjangnya tak hingga memerlukan volume tak hingga juga. Sebaliknya, apabila h_{maks} berkurang, gaya kabel dan luas penampang melintang bertambah, sedangkan panjangnya berkurang. Dengan demikian, ada nilai optimum h_{maks}. Nilai optimum ini dapat diperoleh secara mudah dengan cara menuliskan ekspresi volume kabel yang dinyatakan dalam h_{maks} dengan menggunakan ekspresi analitik yang telah dibahas pada Bab 5.2, kemudian kita minimumkan nilai ekspresi tersebut hingga kita peroleh h_{maks} yang optimum. Secara umum, tinggi sekitar $\frac{2}{3}$ dari bentangnya memberikan nilai volume minimum untuk struktur yang dibebani terbagi rata.

Bagaimana pun, *sag* kabel atau tinggi pelengkung yang tepat selalu bergantung pada berbagai konteks di mana kabel atau pelengkung tersebut digunakan. Kebanyakan struktur kabel yang digunakan pada gedung mempunyai perbandingan antara 1 : 8 dan 1 : 10, bukan 1 : 3. Struktur pelengkung biasanya mempunyai perbandingan tinggi : bentang sekitar 1 : 5.

1. Lihat misalnya C.H. Norris dan J.B. Wilbur, *Elementary Structural Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1960; atau J. Scalzi, W. Poddorny, dan W. Tong, *Design Fundamentals of Cable Roof Structures*, U.S. Steel Corporation, Pittsburgh, Pa., 1969

5.4.2 Desain Struktur Kabel

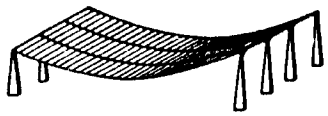
Elemen Penumpu. Selain kabel atap aktual, elemen struktural lain (tiang, penguat kabel, dan sebagainya) diperlukan untuk membentuk struktur gedung. Elemen-elemen tersebut pada umumnya memikul kabel dan merupakan sarana untuk meneruskan gaya vertikal dan horizontal ke tanah. Desain elemen-elemen itu sama rumitnya dengan desain kabel.

Pada desain elemen penumpu, kita dapat menggunakan fondasi yang langsung menyerap reaksi horizontal atau dengan menggunakan batang tambahan yang memikul gaya tersebut. Meskipun desain fondasi yang dapat menyerap gaya vertikal dan horizontalk merupakan masalah yang tidak mudah, hal ini dapat saja dilakukan, bergantung pada kondisi tanah dan kondisi-kondisi fondasi lainnya. Penggunaan batang horizontal tidak banyak dilakukan karena panjangnya panjang-tak-tertumpu (*unbraced*) batang tersebut yang lebih memungkinkan terjadinya tekuk. Sebagai akibatnya, ukuran batang tekan menjadi sangat besar sehingga penggunaannya menjadi tidak efisien.

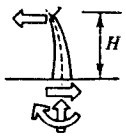
Gambar 5-18 mengilustrasikan beberapa jenis elemen penumpu yang ditemukan pada gedung yang menggunakan kabel. Gambar 5-18(a) memperlihatkan kabel yang ditumpu oleh *pier* pada ujung-ujungnya. Dalam hal ini seluruh gaya horizontal kabel harus ditahan oleh *pier* vertikal yang berfungsi seperti balok kantilever. Karena adanya gaya horizontal yang besar itu, akan timbul momen lentur pada *pier* sehingga *pier* harus dibuat sedemikian rupa besarnya agar dapat memikul lentur itu (masalah lentur dibahas pada Bab 6). Fondasi *pier* juga harus didesain untuk menahan momen guling. Penggunaan elemen penumpu demikian pada dasarnya ekonomis untuk kabel yang dibebani tidak terlalu besar dan mempunyai bentang tak terlalu besar.

Gambar 5-18(b) memperlihatkan kabel yang ditumpu oleh *guyed masts (sistem penumpu berupa kabel dan tiang)*. Apabila *masts* berarah vertikal, maka gaya horizontal kabel dipikul oleh kabel *guy* yang meneruskan gaya itu ke tanah. *Mast* (tiang) itu sendiri memikul gaya aksial tekan. Tidak ada momen lentur yang terjadi. Tiang itu dirancang sebagai kolom (dibahas pada Bab 7) yang memikul jumlah komponen gaya vertikal dari kabel utama dan kabel penguat (guy). Karena fondasi tiang (mast) hanya memikul beban vertikal, desain dan pelaksanaannya menjadi lebih mudah. Akan tetapi, desain fondasi untuk kabel *guy* lebih rumit karena harus

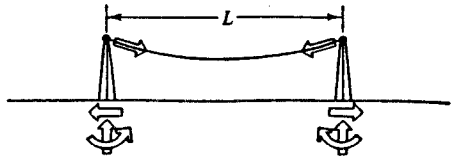
(a) Tumpuan *pier: pier* vertikal yang menumpu ujung-ujung kabel mengalami gaya aksial tekan yang berasal dari komponen vertikal reaksi kabel dan mengalami momen lentur yang berasal dari komponen horizontal reaksi kabel. Sistem ini hanya baik untuk kabel yang mempunyai bentang relatif pendek.



tumpuan *Pier*



Semakin besar *L* atau tinggi *H*. semakin besar pula *pier* yang diperlukan.



Sistem gaya dasar. Perhatikan bahwa fondasinya harus mampu mencegah terjadinya guling pada *pier*.

(b) Tumpuan *guyed mast* komponen horizontal gaya ujung kabel diserap oleh *guy* diagonal untuk selanjutnya diteruskan ke tanah. *Masts* (tiang) vertikal hanya mengalami gaya aksial tekan. Sistem ini baik untuk kabel berbentang panjang

Tumpuan *guyed mast*

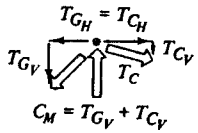
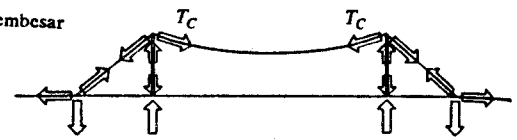


Diagram benda bebas pada puncak tiang

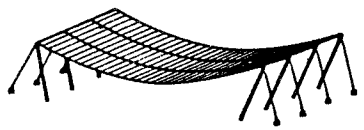
Gaya yang membesar

Apabila kemiringan kabel *guy* berubah seperti tergambar, gaya-gaya pada kabel *guy* akan bertambah. Gaya pada tiang juga membesar.

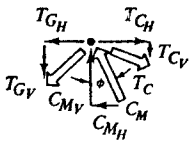


Sistem gaya dasar. Tiang memikul gaya aksial. Fondasi kabel *guy* harus mencegah terjadinya gelincir dan lepas ke atas pada kabel *guy*

(c) *Guyed masts* miring: memiringkan tiang akan menyebabkan sebagian gaya ujung kabel dipikul oleh tiang sehingga gaya yang dipikul oleh kabel *guy* berkurang. Sistem ini baik untuk kabel berbentang panjang.

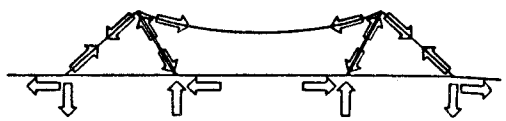


Guyed masts miring



$$T_{G_H} + C_{M_H} = T_{C_H}$$
$$T_{G_V} + T_{C_V} = C_{M_V}$$
$$C_M = C_{M_V}/\cos\phi$$

Diagram benda bebas puncak tiang



Sistem gaya dasar. *Masts* hanya memikul gaya ke bawah. Fondasi kabel *guy* harus mencegah gelincir dan lepas (ke atas) pada *guy*.

GAMBAR 5-18 Berbagai jenis sistem penumpu kabel

memikul gaya lateral (horizontal) dan juga gaya *uplift* (vertikal). Secara umum penggunaan sistem *guyed masts* merupakan cara yang efisien pada sistem penumpu kabel.

Cara yang lain dari yang telah disebutkan di atas terlihat pada Gambar 5-18(c) di mana *masts* (tiang) mempunyai arah miring, bukan vertikal. Pada kasus demikian, sebagian gaya horizontal dipikul oleh tiang miring, dan sisanya dipikul oleh kabel *guy*. Dengan demikian, gaya aksial tekan pada tiang (masts) menjadi bertambah sehingga ukurannya bertambah. Sebaliknya, adanya kemiringan *masts* mengurangi gaya pada kabel *guy*, dan juga memudahkan desain fondasi untuk *guy*.

Pada pembahasan di atas, penentuan *sag* pada kabel merupakan variabel penting karena panjang *pier* maupun *masts* berhubungan langsung dengan nilai itu. *Sag* semakin tinggi berarti elemen penumpu semakin penting. *Sag* yang mempunyai perbandingan tinggi : bentang lebih kecil daripada sepertiga biasanya memberikan hasil yang optimum. Perbandingan sag : bentang sekitar 1: 8 sampai 1 : 10 sering digunakan.

Desain terhadap Efek Angin. Seperti telah disebutkan di atas, kestabilan kabel yang mengalami gaya angin sangat penting karena adanya fenomena *flutter* (getaran). Meskipun pembahasan fenomena getaran pada buku ini tidak mendalam, di sini ditinjau sepintas desain yang memperhitungkan efek tersebut.

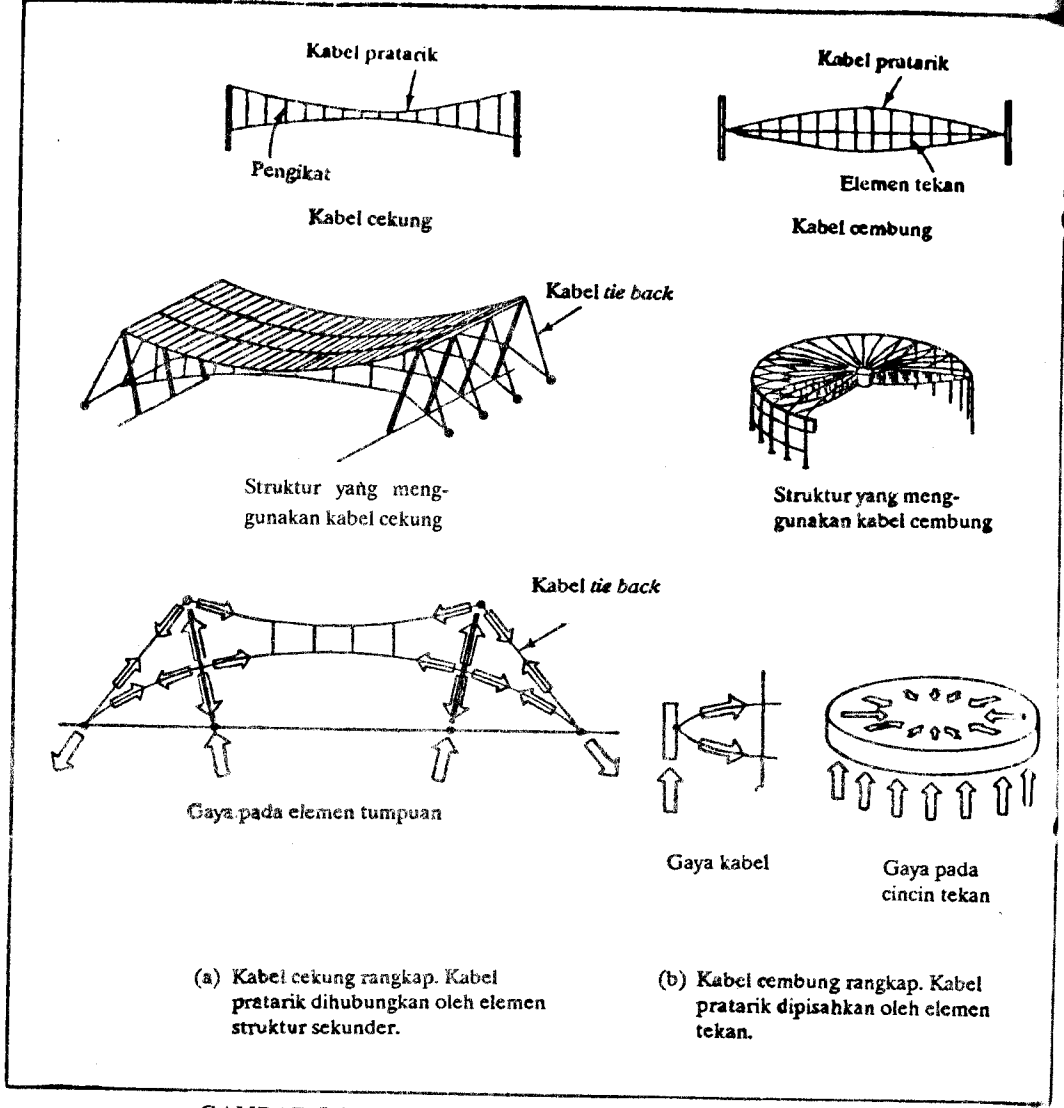
Pada struktur, getaran yang diakibatkan oleh angin (atau gempa bumi) berupa gerakan osilasi yang berulang pada interval waktu tertentu. Interval waktu ini disebut *periode getaran*. Yang disebut *frekuensi getaran* merupakan kebalikan dari periode.

Semua struktur gantungan (dan juga struktur-struktur lain) mempunyai *frekuensi alami getaran* apabila mengalami gaya eksternal. Apabila gaya dinamis eksternal bekerja pada struktur pada selang frekuensi tertentu, keadaan bergetar dapat terjadi. Pada keadaan tersebut frekuensi gaya *pemaksa* dan frekuensi alami struktur sama, kondisi yang disebut *resonansi*. Pada keadaan resonansi, struktur mengalami getaran sangat besar dan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur (lihat Bab 3.2.4).

Frekuensi alami kabel gantung diberikan oleh f_n $(N/\pi/L)\sqrt{T/(w/g)}$ di mana L adalah panjang kabel, N adalah bilangan bulat, w adalah beban per satuan panjang, T adalah gaya tarik kabel, dan g adalah percepatan gravitasi bumi. Tiga ragam vibrasi pertama diperlihatkan pada Gambar 5-8. Kabel itu dapat mengalami getaran seperti pada gambar tersebut atau ragam lainnya, bergantung pada frekuensi gaya pemaksa (gaya dinamis pada struktur).

Resonansi pada kabel akan terjadi apabila gaya pemaksa eksternal mempunyai frekuensi yang benar-benar sama dengan frekuensi alami kabel. Pada struktur kabel, frekuensi gaya angin sering kali sangat dekat dengan frekuensi struktur kabel.

Ada beberapa cara dasar untuk mengatasi masalah getaran akibat gaya angin. Salah satunya adalah memperbesar beban mati pada atap, sehingga memperbesar gaya tarik kabel dan mengubah frekuensi alaminya. Cara lain adalah dengan memberikan kabel *guy* sebagai angker pada titik-titik tertentu untuk mengikat struktur ke dalam tanah. Ada pula yang menggunakan kabel menyilang atau sistem kabel



GAMBAR 5-19 Penggunaan sistem kabel-rangkap untuk mencegah getaran pada atap akibat efek angin. Pada kasus-kasus yang diperlihatkan, gaya kabel pada kabel atas sedikit berbeda dengan yang ada pada kabel bawah. Dengan demikian setiap kabel mempunyai frekuensi alami yang berbeda, sehingga merupakan mekanisme *peredam-diri*. Kabel yang satu tidak dapat mengalami getaran bebas karena adanya kabel lainnya.

rangkap. Metode terakhir ini sangat menarik karena secara internal akan timbul sistem peredam.

Perhatikan susunan yang terlihat pada Gambar 5-19 di mana ada kabel atas dan bawah yang dihubungkan oleh elemen-elemen interior. Pada masing-masing kasus, setiap kumpulan kabel diberi gaya pratarik. Apabila susunan yang terlihat pada Gambar 5-19(b) digunakan, maka susunan itu akan berperilaku sebagai rangka batang dalam hal elemen struktur atas cenderung mengalami tekan dan elemen struktur bawah cenderung mengalami tarik. Karena kedua kabel telah mengalami pratarik, maka kecenderungan tersebut mengurangi gaya pada kabel atas dan menambah gaya tarik pada kabel bawah. Oleh karena itu, kabel atas harus didesain dan diberi gaya pratarik sedemikian rupa sehingga gaya pratarik yang diberikan tidak menjadi gaya nol atau gaya tekan pada saat dibebani aktual. Kabel bawah harus didesain secara cukup untuk memikul pratarik dan gaya tarik tambahan pada saat dibebani aktual. Struktur yang terlihat pada Gambar 5-19(a) berperilaku berbeda apabila dibebani dalam hal kabel atas yang diberi pratarik mengalami gaya tarik tambahan sementara pratarik pada kabel bawah berkurang.

Pada kedua struktur, beban eksternal dan gaya pratarik menyebabkan timbulnya gaya horizontal besar pada elemen penumpu. Gaya ini dapat dipikul oleh sistem kabel seperti terlihat pada Gambar 5-19(a). Cincin tekan kontinu yang pada umumnya terbuat dari baja sering digunakan untuk memikul gaya tersebut seperti terlihat pada Gambar 5-19(b). Karena cincin itu memikul gaya horizontal, kolomnya hanya memikul beban vertikal.

Perilaku dinamis pada jenis atap yang telah disebutkan di atas cukup menarik untuk dipelajari. Seperti telah disebutkan, frekuensi alami getaran kabel bergantung pada gaya tarik yang ada pada kabel. Karena kedua kabel mempunyai gaya tarik berbeda, jelas bahwa masing-masing mempunyai frekuensi alami getaran yang berbeda. Frekuensi alami getaran kabel bawah akan selalu berbeda dengan frekuensi alami kabel atas. Pada saat gaya eksternal akan memaksa terjadinya getaran dengan ragam dasar pada satu kabel, kabel lainnya cenderung meredamnya karena adanya perbedaan frekuensi alami tersebut sehingga osilasi dapat diredam.

Sekalipun demikian, masih ada kemungkinan kedua kabel bergetar sebagai satu kesatuan dengan frekuensi sendiri, yang tidak sama dengan frekuensi setiap kabel. Frekuensi alami sistem kabel itu berkaitan dengan kombinasi setiap frekuensi kabel, dan nilainya lebih besar dari nilai setiap frekuensi. Apabila frekuensi kombinasi ini dapat dijadikan sedemikian besar dengan desain yang benar, maka akan timbul efek peredam yang dapat meredam getaran akibat angin tanpa terjadi bahaya sedikit pun pada sistem struktur.

5.4.3 Desain Struktur Pelengkung

Desain terhadap Variasi Beban. Seperti telah disebutkan, salah satu dari aspek penting pada pelengkung modern adalah bahwa struktur dapat didesain untuk menahan sejumlah tertentu variasi beban tanpa terjadi perubahan bentuk yang mencolok maupun kerusakan. Hanya pelengkung yang didesain dengan material kaku, seperti baja atau beton bertulang, yang mempunyai kemampuan demikian.

Bentuk pelengkung biasanya ditentukan terlebih dulu berdasarkan kondisi beban utama (misalnya parabolik untuk beban terdistribusi merata). Apabila ada beban lain yang bekerja pada pelengkung, akan timbul momen lentur sebagai tambahan pada gaya aksial. Agar pelengkung itu mampu memikul variasi beban tersebut, kita harus mendesain sedemikian besarnya agar cukup untuk memikul kombinasi momen lentur dan gaya aksial. Cara-cara untuk melakukan hal ini dibahas pada Bab 6 yang membahas elemen struktur terlentur. Pada Bab 5.4.3 ini aspek penting yang perlu diketahui ialah bahwa merancang elemen struktur kaku untuk memikul momen lentur biasanya akan menghasilkan ukuran elemen struktur yang sangat sensitif terhadap momen lentur yang timbul. Semakin besar momen lentur, semakin besar pula ukuran elemen struktur yang diperlukan. Apabila momen lenturnya sangat besar, maka desain tersebut tidak layak lagi. Dengan demikian, tinjauan desain yang perlu dilakukan adalah menentukan kembali bentuk pelengkung yang dapat memberikan momen lentur minimum untuk segala kondisi pembebanan yang mungkin. Bagaimana pun, momen lentur selalu ada karena satu bentuk hanya merupakan *funicular* untuk satu kondisi beban. Singkat kata, tidak tepat untuk menyebut pelengkung kaku sebagai *funicular* karena struktur demikian hanya *funicular* untuk satu kondisi pembebanan.

Perhatikan pelengkung tiga sendi yang terlihat pada Gambar 5-20(a) (yang pada dasarnya dibentuk berdasarkan beban berarah radial ke dalam). Struktur ini dibebani terpusat. Karena struktur ini mempunyai tiga sendi, maka dapat dianalisis seperti pada Bab 5.3.1. Hasil analisis ini terlihat pada Gambar 5-20(b). Dengan memperhatikan diagram benda bebas salah satu dari kedua segmen struktur kita dapat melihat bahwa gaya reaksi dan gaya pada titik hubung sendi dapat dipandang sebagai gaya eksternal terhadap elemen struktur. Dalam kasus ini gaya-gaya tersebut kolinear. Seperti terlihat pada Gambar 5-20(c), gaya-gaya tersebut menyebabkan timbulnya momen lentur di sepanjang elemen struktur. Momen lentur terbesar akan terjadi pada titik yang disebut *M*. Apabila struktur tidak didesain untuk memikul momen, pada titik ini dapat terjadi retak yang kemudian dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan. Semakin besar lengan momen gaya eksternal terhadap suatu titik pada struktur, maka semakin besar momen lentur yang timbul, begitu pula sebaliknya.

Bergantung pada beban yang bekerja, struktur itu dapat didesain untuk memikul momen lentur yang timbul. Meskipun demikian, dari tinjauan desain, kita lebih menginginkan desain yang meminimumkan atau bahkan mengeliminasi momen lentur. Untuk contoh kita ini, mencari bentuk struktur itu mudah. Apabila kita menggunakan elemen struktur yang lurus, yang berimpit dengan garis kerja gaya-gaya kolinear, maka elemen struktur itu tidak akan mengalami momen lentur. Hanya ada gaya aksial padanya karena lengan momen akibat gaya eksternal adalah nol. Karena itulah untuk beban tersebut, bentuk strukturnya seperti terlihat pada Gambar 5-20(d), tidak seperti pada Gambar 5-20(a). Ukuran penampangnya dapat jauh lebih kecil.

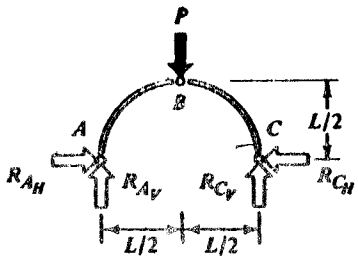
Perlu diperhatikan bahwa bentuk yang diperoleh di atas, yang memikul beban tanpa terjadi momen lentur, adalah bentuk *funicular* untuk beban tersebut sebagaimana diperoleh dari kabel berorientasi lawannya dan dibebani sama. Perlu diingat

juga bahwa besar momen lentur yang timbul pada suatu titik struktur semula berbanding langsung dengan deviasi titik tersebut ke bentuk *funicular* [lihat Gambar 5-20(e)]. Hal ini sangat penting diperhatikan dalam desain. Pembaca dianjurkan mengulang kembali pembahasan Bab 5.3.1 mengenai cara memberi bentuk struktur agar dapat memikul beban dengan hanya mengalami gaya aksial.

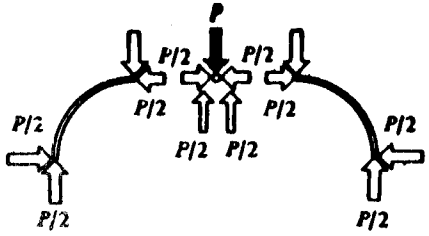
Meskipun satu bentuk struktur hanya *funicular* untuk satu jenis pembebanan, efek lentur dapat diminimumkan dalam desain. Perhatikan struktur yang terlihat pada Gambar 5-21 di mana diinginkan desain struktur pelengkung yang mempunyai tiga sendi untuk memikul kondisi pembebanan sebagai berikut: (1) beban mati saja, (2) beban mati penuh ditambah beban hidup penuh, dan (3) beban mati penuh ditambah beban hidup pada salah satu segmen struktur. Gambar 5-21(b)–(d) memperlihatkan bentuk-bentuk *funicular* untuk kondisi-kondisi pembeban tersebut. Sendi tengah menentukan tinggi struktur di tengah karena garis *funicular* harus melalui sendi itu (sendi adalah titik di mana momen lentur dan rotasional akibat gaya-gaya terhadap titik tersebut adalah nol – kondisi ini dipenuhi oleh semua titik pada kurva *funicular*). Dengan menggabungkan bentuk-bentuk *funicular* tersebut, kita peroleh Gambar 5-21(e). Apabila efek-efek beban hidup *off-balanced* cukup kecil, maka kurva-kurva itu akan sangat berdekatan. Apabila kurva ini sangat berdekatan, maka struktur tersebut dapat didesain mempunyai penampang sedemikian hingga semua kumpulan kurva dikandung oleh ukuran itu. Apabila hal ini dilakukan, maka momen lentur pada struktur akan menjadi kecil untuk semua kondisi pembebanan yang mungkin. Jika semua garis *funicular* dapat dikandung di tengah penampang melintang elemen struktur, maka struktur hanya memikul tegangan tekan, tidak ada tegangan tarik (lihat Bab 7.2.1 yang membahas bagaimana gaya yang bekerja di tengah penampang hanya menimbulkan tegangan tekan, tidak ada tegangan tarik). Gambar 5-21(f) mengilustrasikan analisis yang lebih kuantitatif untuk struktur tersebut. Bentuk struktur yang dimaksud terlihat pada Gambar 5-21(g).

Elemen-elemen Penumpu. Seperti pada kabel, masalah dasar dalam desain pelengkung ialah apakah sistem yang memikul gaya horizontal pada ujung-ujungnya itu batang horizontal atau fondasi. Apabila mungkin, penggunaan batang horizontal sering dilakukan. Karena batang horizontal pada struktur ini merupakan batang tarik, maka batang ini sangat efisien dalam memikul gaya horizontal ke luar yang terjadi pada ujung pelengkung yang dibebani. Dengan demikian, fondasi hanya diperlukan untuk memikul reaksi vertikal dan dapat didesain dengan cara yang relatif lebih sederhana dibandingkan dengan yang harus memikul juga gaya horizontal.

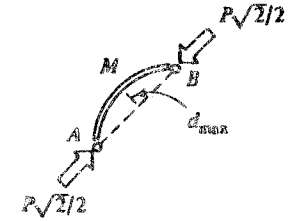
Elemen vertikal sebagai sistem penumpu pada pelengkung sangat jarang dilakukan, tidak seperti pada kabel. Apabila mungkin, kita dapat meletakkan pelengkung langsung di atas tanah tanpa harus ada elemen vertikal dulu. Apabila pelengkung harus digunakan di atas elemen struktur vertikal, biasanya digunakan elemen struktur vertikal yang mampu memikul momen dan gaya normal.



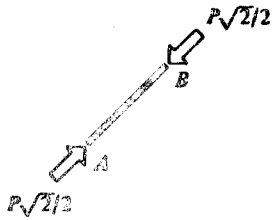
(a) Pelengkung tigasendi setengah lingkaran dengan beban terpusat



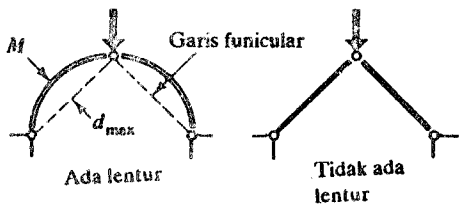
(b) Analisis struktur



(c) Gaya reaksi pada titik-titik ujung menyebabkan terjadinya lentur. Lentur maksimum terjadi pada titik M yaitu sebesar $M_{maks} = (\sqrt{2}/2)\delta_{maks}$

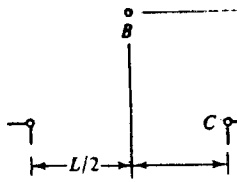


(d) Apabila pelengkung dibuat sesuai dengan garis kerja gaya-gaya pada ujung, maka tidak akan ada momen lentur. Hal ini berarti membuat struktur itu *funicular* untuk beban yang ada.

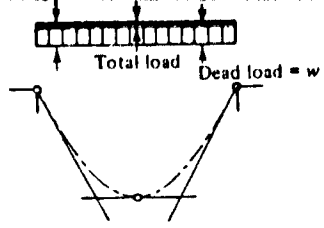


(e) Momen yang timbul pada struktur sebanding dengan deviasi struktur dari bentuk *funicular*.

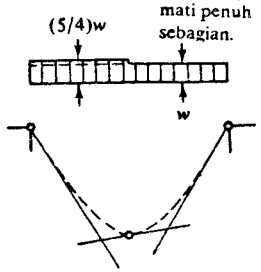
GAMBAR 5-20 Momen lentur yang timbul pada struktur pelengkung yang tidak secara funicular dibentuk untuk beban yang diberikan.



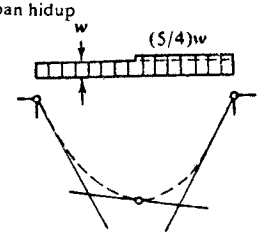
(a) Anggap bahwa lokasi tiga sendi diketahui. Kita akan mendesai struktur untuk memikul beban mati + hidup penuh serta beban mati penuh + beban hidup sebagian.



(b) Bentuk *funicular* untuk kondisi beban penuh.

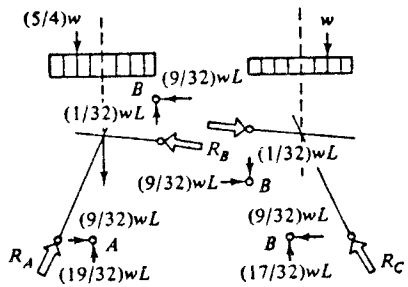


(c) Bentuk *funicular* untuk beban mati penuh + sebagian beban hidup (segmen kiri diberi beban hidup)

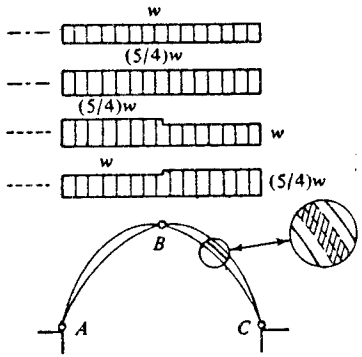


(d) Bentuk *funicular* untuk beban mati penuh + beban hidup sebagian (segmen kanan diberi beban hidup)

(e) Bentuk *funicular* gabungan



(f) Analisis secara kasar dapat diterapkan untuk memperoleh kemiringan kritis struktur. Diperlukan pula analisis selain ini.



(g) Apabila struktur didesain untuk menganduug garis-garis *funicular* untuk berbagai kondisi beban yang mungkin, maka lentur dapat diminimumkan. Apabila garis-garis tersebut terkandung dalam sepertiga-tengah penampang melintang, maka hanya tegangan aksial yang timbul pada struktur.

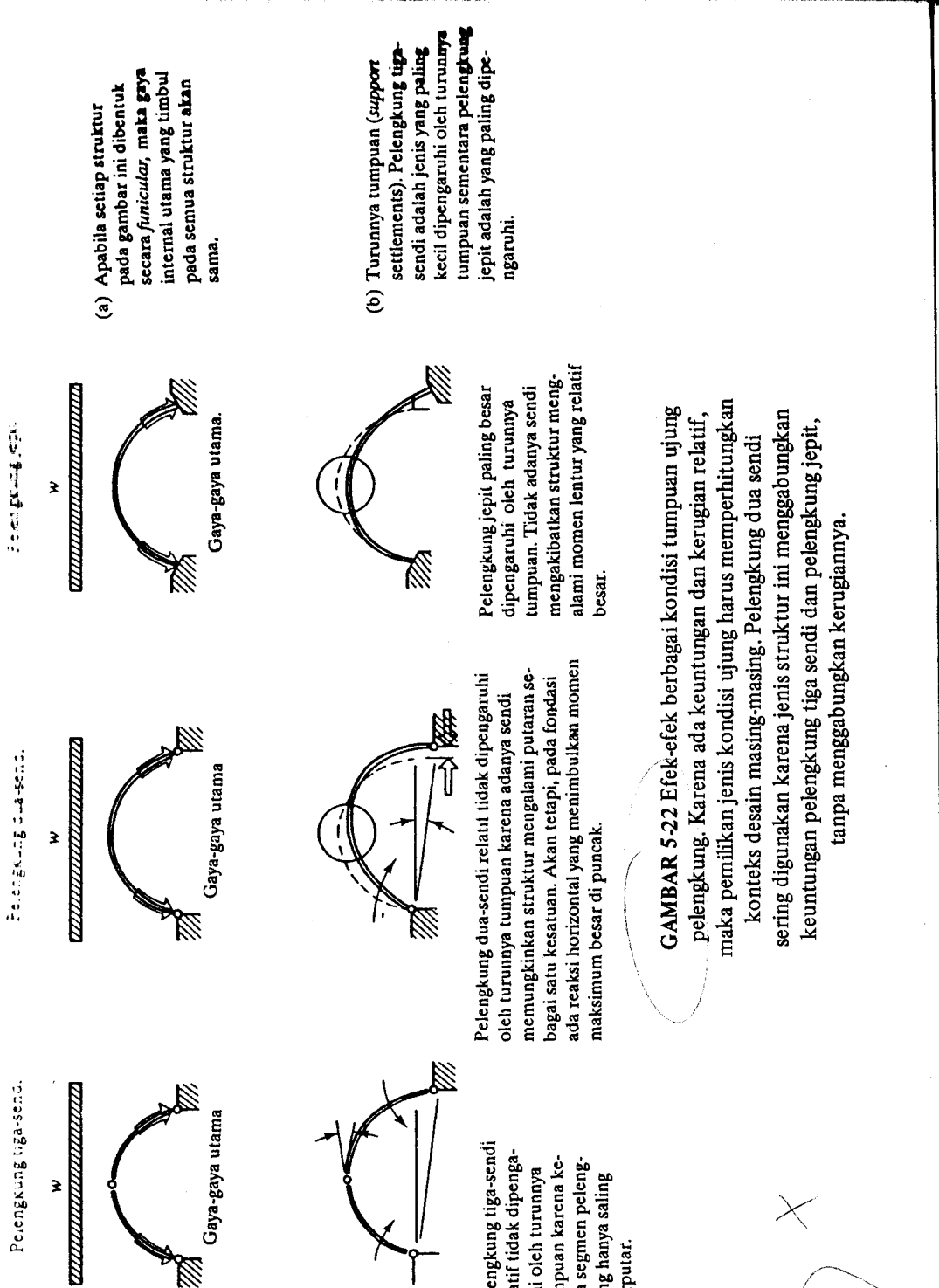
GAMBAR 5-21 Perancangan dengan meminimumkan efek variasi beban. Jembatan Salginatobel yang didesain oleh Robert Maillart dan dibangun antara tahun 1929 dan 1930 menunjukkan cara pembuatan bentuk seperti pada (g) tetapi menggunakan konsep struktur yang lebih rumit. Beberapa jembatan baja, seperti yang ada di Roxbary, Massachussets, yang dianggap dirancang oleh perencana anonim, juga mempunyai bentuk umum yang sama.

Kontrol Kondisi Tumpuan. Pada desain struktur pelengkung kaku, penentuan bagaimana kondisi pada ujung adalah hal yang cukup penting. Ada tiga jenis utama pelengkung berdasarkan kondisi ujungnya, yaitu pelengkung tiga sendi, pelengkung dua sendi, dan pelengkung jepit (lihat Gambar 5-22). Pembahasan kita lebih banyak terpusat pada pelengkung tiga sendi karena jenis pelengkung inilah yang statis tertentu. Reaksi, gaya-gaya pada titik hubung, momen, serta gaya internal pada pelengkung tiga sendi dapat diperoleh dengan menerapkan secara langsung persamaan keseimbangan. Sedangkan analisis pelengkung dua sendi serta pelengkung jepit tidak dapat hanya didasarkan atas keseimbangan statis. Analisisnya di luar lingkupan buku ini.

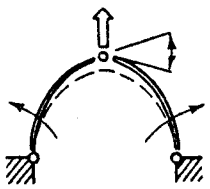
Apabila didesain sebagai bentuk yang *funicular* untuk suatu jenis beban, perilaku ketiga jenis struktur pelengkung kaku sama saja terhadap beban tersebut. Perbedaan yang ada hanyalah pada kondisi ujung (tumpuan) yang dipakai. Gaya tekan internal yang timbul sama saja. Sekalipun demikian, apabila faktor-faktor lain ditinjau, akan muncul perbedaan nyata. Faktor-faktor yang penting meliputi efek *settlement* (penurunan) tumpuan, efek perpanjangan atau perpendekan elemen struktur akibat perubahan temperatur, dan besar relatif defleksi akibat beban. Gambar 5-22 mengilustrasikan bagaimana jenis-jenis pelengkung itu berperilaku terhadap faktor-faktor tersebut.

Pada umumnya, perbedaan kondisi ujung dikehendaki untuk menghadapi fenomena yang berbeda. Adanya sendi pada struktur sangat berguna apabila *settlement* tumpuan dan efek termal diperhitungkan karena ujung sendi itu memungkinkan struktur tersebut berotasi terhadap titik sendi tersebut secara bebas. Apabila pada tumpuan yang digunakan adalah jepit, fenomena itu akan menyebabkan terjadinya momen lentur. Sekalipun demikian, pelengkung jepit dapat melendut lebih kecil dibandingkan dengan jenis pelengkung lainnya apabila dibebani.

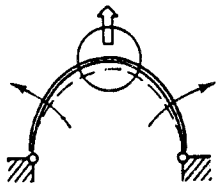
Penentuan kondisi tumpuan yang akan digunakan harus dilakukan berdasarkan kondisi desain yang ada dan dengan memperhitungkan mana kondisi yang dominan. Yang sering digunakan adalah pelengkung dua sendi karena jenis struktur ini menggabungkan keuntungan yang ada pada kedua jenis pelengkung lainnya tanpa menggabungkan kerugian kedua-duanya.



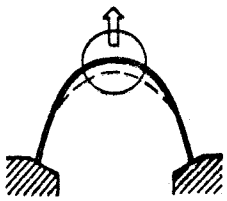
GAMBAR 5-22 Efek-efek berbagai kondisi tumpuan ujung pelengkung. Karena ada keuntungan dan kerugian relatif, maka pemilihan jenis kondisi ujung harus memperhitungkan konteks desain masing-masing. Pelengkung dua sendi sering digunakan karena jenis struktur ini menggabungkan keuntungan pelengkung tiga sendi dan pelengkung jepit, tanpa menggabungkan kerugiannya.



Pelengkung tiga sendi memungkinkan terjadinya rotasi relatif di antara elemen-elemen structur sehingga mengurangi tegangan akibat ekspansi dan kontrasi temperatur.

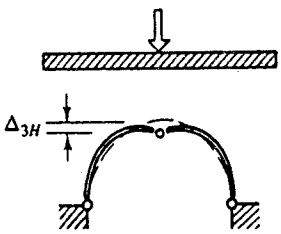


Adanya sendi pada tumpuan memungkinkan pelengkung dua sendi berotasi dan mengurangi efek temperatur. Akan tetapi tetap ada momen lentur, pada struktur.

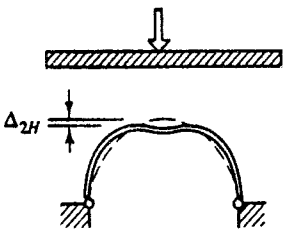


Pelengkung jepit sangat dipengaruhi oleh ekspansi dan kontraksi temperatur. Karena tidak ada mekanisme yang mengurangi momen, maka momen lentur yang timbul relatif besar.

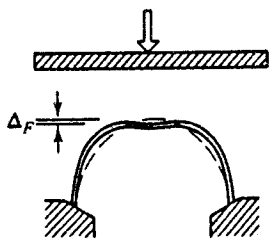
(c) Ekspansi dan kontraksi karena perubahan temperatur. Pelengkung tiga-sendi paling sedikit dipengaruhi sementara pelengkung jepit paling dipengaruhi.



Adanya sendi mengurangi kekakuan pelengkung tiga-sendi dan defleksinya besar.



Pelengkung dua-sendi lebih kaku daripada pelengkung tiga sendi, tetapi kurang kaku dibandingkan dengan pelengkung jepit.



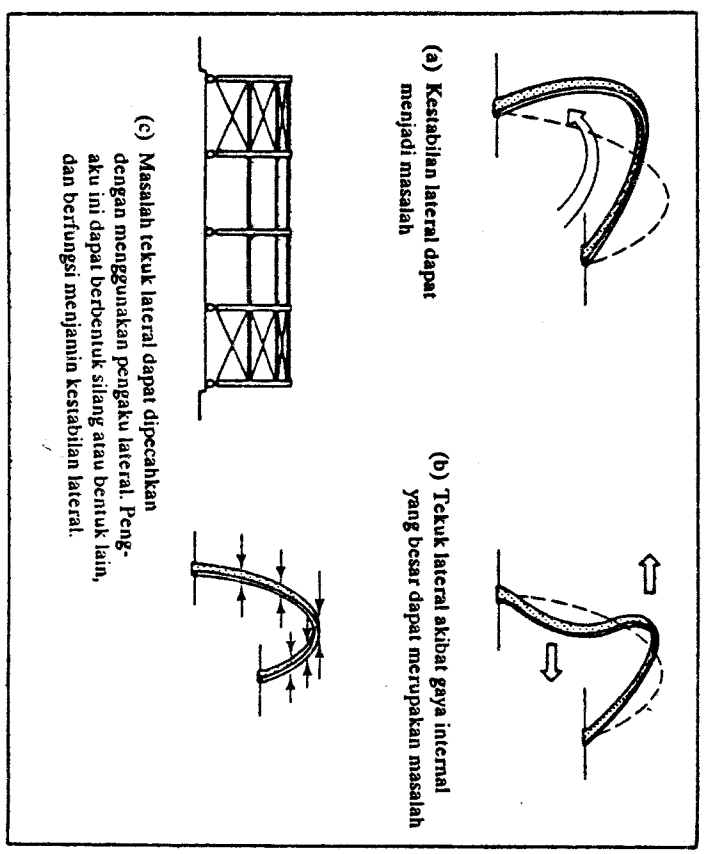
Pelengkung jepit adalah yang paling kaku sehingga defleksinya paling kecil.

(d) Kekakuan: pelengkung jepit lebih diinginkan untuk kontrol defleksi, kemudian pelengkung dua-sendi. Pelengkung tiga-sendi adalah yang paling tidak baik untuk masalah defleksi. Untuk beban dan struktur pelengkung yang sama dalam segala hal kecuali kondisi ujungnya, berlaku:

$$D_F < \Delta_{2H} < \Delta_{3H}$$

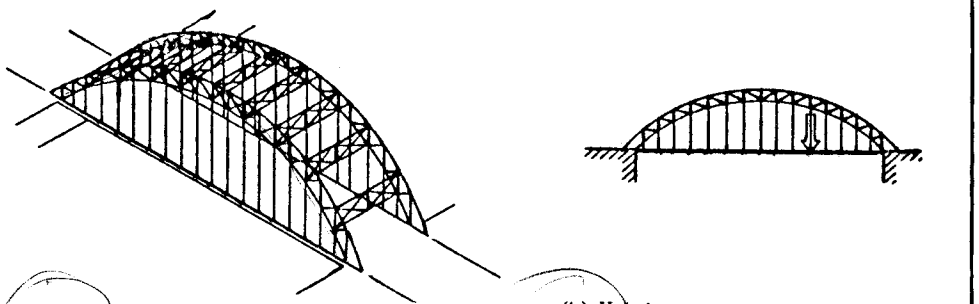
Gambar 5.22 (sambungan)

Perilaku Lateral pada Pelengkung. **Tinjauan desain utama adalah bagaimana mengatasi perilaku pelengkung pada arah lateral. Jelas bahwa pada umumnya, pelengkung yang terletak pada satu bidang vertikal harus dicegah dari goyangan lateral. Ada dua mekanisme yang umum dipakai untuk mencegah hal ini. Salah satunya adalah dengan menggunakan tumpuan jepit. Akan tetapi, seperti telah disebutkan, ada kerugian tertentu pada penggunaan tumpuan jepit, yang lebih berhubungan dengan perilaku pelengkung di dalam bidang daripada di luar bidang. Untuk struktur yang sangat besar, penggunaan tumpuan jepit untuk mencegah ketidakstabilan lateral juga memerlukan fondasi masif agar guling tidak terjadi. Cara lain memperoleh kestabilan lateral ialah dengan menggunakan elemen struktur lain yang dipasang secara transversal terhadap pelengkung tersebut. Sepasang pelengkung di tepi-tepi struktur lengkap dapat distabilkan dengan menggunakan elemen-elemen diagonal. Pelengkung interior dapat distabilkan dengan cara menghubungkannya dengan pelengkung lainnya dengan menggunakan elemen struktur transversal.**



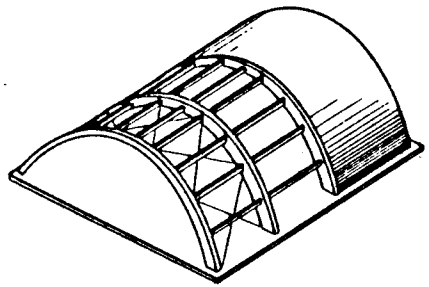
GAMBAR 5-23 Tinjauan desain pelengkung.

Masalah kedua yang penting pada perilaku lateral pelengkung ialah masalah tekuk lateral. Karena gaya internal yang timbul pada pelengkung biasanya tidak terlalu besar, desain pelengkung dengan menggunakan material bermutu tinggi (misalnya baja) akan menghasilkan elemen yang relatif langsing. Karena langsingnya, ada kemungkinan terjadi tekuk ke luar bidang dengan ragam seperti terlihat pada Gambar 5-23(b). Seperti pada rangka batang, salah satu pemecahan masalah tekuk lateral ialah untuk memperbesar kekakuan pelengkung pada arah lateral dengan memperbesar dimensi lateral. Pemecahan lainnya ialah dengan menggunakan pengaku yang diletakkan pada jarak-jarak tertentu (Gambar 5-24). Dengan menggunakan elemen-elemen pengaku lateral, struktur pelengkung yang digunakan dapat yang langsing. Perlu diperhatikan bahwa sistem yang digunakan untuk menstabilkan pelengkung terhadap guling secara lateral juga memberikan pengaku lateral padanya dan dapat mencegah terjadinya tekuk lateral.

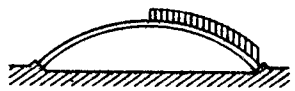


(a) Pelengkung kaku digunakan pada jembatan. Dek jembatan digantung pada pelengkung. Elemen struktur transversal menstabilkan pelengkung terhadap gaya lateral.

(b) Kekakuan pelengkung membuatnya mampu memikul beban terpusat pada dek jembatan. Pada gambar ini, kekakuan diperoleh dengan triangulasi elemen-elemen diskret.



(c) Pelengkung jepit digunakan pada gedung. Dek atap biasanya diletakkan langsung pada elemen struktur transversal yang pada gilirannya ditumpu oleh pelengkung. Kekakuan lateral diberikan oleh elemen *bracing*.



(d) Kekuan pelengkung membuatnya mampu memikul beban atap tak merata. Kedua macam elemen kaku dapat digunakan pada gedung besar atau susunan segitiga pada (b).

GAMBAR 5-24 Penggunaan pelengkung kaku pada jembatan dan gedung.

SOAL

5-1. Berapakah gaya maksimum yang timbul pada kabel yang memikul beban terpusat P di tengah bentang dan bentangnya L? Anggap bahwa kabel tersebut mempunyai *sag* maksimum $h = L/5$.

5-2. Berapakah gaya maksimum yang timbul pada kabel yang memikul beban terbagi rata 580 lb/ft dan mempunyai bentang 200 ft? Anggap bahwa kabel mempunyai *sag* maksimum di tengah sebesar 20 ft.
Jawaban: 135000 lb.

5-3. Berapakah gaya maksimum yang timbul pada pelengkung yang dibentuk secara *funicular* dan memikul beban terdistribusi rata 800 lb/ft serta mempunyai bentang 120 ft? Di mana gaya tersebut terjadi?

5-4. Berapakah gaya maksimum yang timbul pada pelengkung yang dibentuk secara *funicular* terhadap beban terbagi rata 10000 N/m dan mempunyai bentang 35 m? Anggap bahwa tinggi pelengkung 8 m. Berapakah gaya-gaya di tengah bentang pelengkung?
Jawaban: 191,4 kN.

5-5. Tentukanlah bentuk eksak kabel yang mempunyai bentang 100 ft, mempunyai *sag* maksimum 10 ft, dan memikul beban terpusat 5000 lb pada 25, 50, dan 75 ft dari tumpuan kiri. Tentukanlah gaya yang timbul pada setiap segmen kabel.

5-6. Gambarlah diagram momen dan geser untuk kondisi beban yang disebutkan pada Soal 5-5 dan tentukan bagaimana struktur kabel tersebut memberikan momen dan geser internal yang mengimbangi momen dan geser eksternal.

5-7. Bagaimanakah gaya maksimum pada kabel dalam Soal 5-1 dipengaruhi apabila tumpuan kiri mempunyai elevasi $h = L/10$ di atas tumpuan kanan? Asumsikan bahwa *sag* maksimum kabel adalah $L/5$, tetapi anggap bahwa jarak tersebut diukur terhadap garis yang menghubungkan kedua titik tumpuan.

5-8. Tentukan bentuk *funicular* untuk struktur yang memikul beban terbagi rata w dari $x = 0$ sampai $x = L/3$ saja. Mula-mula gambarlah bentuk yang mungkin untuk struktur tersebut, kemudian tentukan ekspresi aljabarnya.

5-9. Tentukanlah bentuk *funicular* untuk struktur yang memikul beban terbagi rata w di seluruh bentangnya, dan beban terpusat P di tengah bentang. Gambarlah dahulu bentuk yang mungkin untuk struktur tersebut, kemudian tentukan ekspresi aljabarnya.

5-10. Adakah jarak maksimum untuk bentang kabel? Diskusikanlah.

5-11. Apabila jawaban untuk Soal 5-10 ya, carilah bentang maksimum tersebut. Buatlah asumsi-asumsi yang diperlukan untuk menjawabnya.

Bab 6

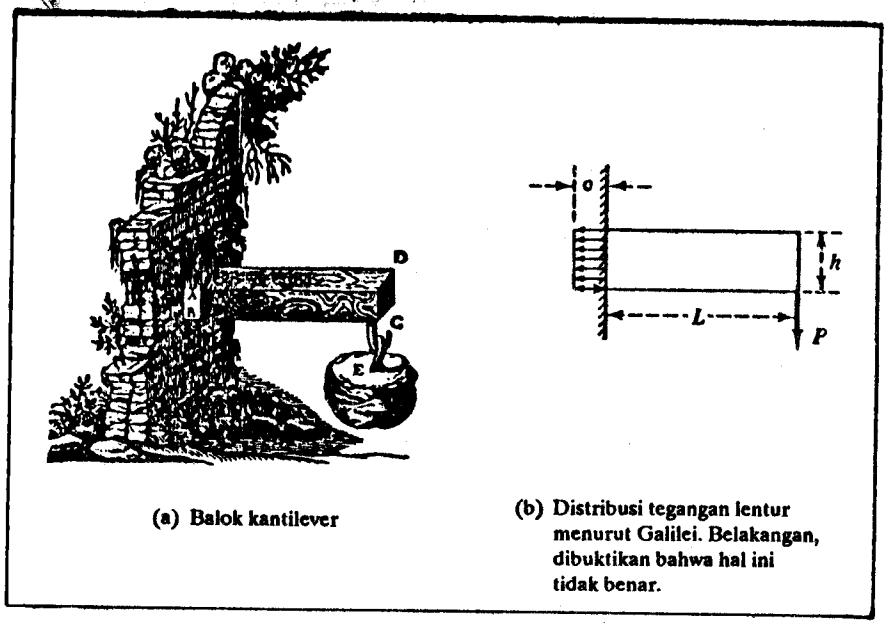
ELEMEN LENTUR: BALOK SEDERHANA

6.1 PENDAHULUAN

Tidak banyak elemen struktur yang digunakan seperti yang disebut balok (beam). Balok telah mulai digunakan untuk mentransfer beban vertikal secara horizontal sejak pertama kali gedung dibangun. Sistem *post-and-beam* di mana elemen struktur horizontal diletakkan sederhana di atras dua elemen struktur vertikal merupakan konstruksi dasar yang pernah digunakan oleh arsitek sejak dulu. Pada sistem tersebut, secara sederhana balok digunakan sebagai elemen penting dalam konstruksi. Meskipun dianggap sederhana dalam hal konstruksi, balok mempunyai karakteristik internal yang lebih rumit dalam memikul beban dibandingkan dengan jenis elemen struktur lainnya (misalnya rangka batang maupun kabel). Di waktu lampau masih sedikit pengetahuan mengenai mekanisme bagaimana balok memikul beban. Leonardo da Vinci telah membuat sketsa yang mencoba menjelaskan aksi balok secara rasional.

Namun, produk *Renaissance* yang lain bukan hanya meletakkan dasar teori balok bagi pemahaman kita sekarang, tetapi juga menemukan dalam kata-kata Hans Straub, "... cabang ilmu pengetahuan yangf benar-benar baru: teori kekuatan bahan (strength of materials)." Orangnya adalah Galileo Galilei. Dialah yang pertama kali memecahkan masalah lentur secara sistematis (lihat Gambar 6-1). Sebutan *masalah lentur* diartikan pada studi mengenai tegangan dan deformasi yang timbul pada elemen yang mengalami aksi gaya (umumnya tegak lurus pada sumbu elemen sehingga salah satu tepi serat mengalami perpanjangan dan tepi serat lainnya mengalami perpendekan

Meskipun Galilei tidak benar-benar sukses dalam memecahkan masalah tersebut, ia telah berhasil membuat formulasi yang mendasari penemuan-penemuan berikut-



(a) Balok kantilever

(b) Distribusi tegangan lentur menurut Galilei. Belakangan, dibuktikan bahwa hal ini tidak benar.

GAMBAR 6-1 Teori balok purba. (Dari Galileo Galilei, *Discorsi e dimostazioni matematiche*, 1638.)

nya. Nama-nama seperti Hooke, Mariotte, Parent, Leibnitz, Navier, dan Coulomb berkaitan dengan masalah tersebut. Auguste Coulomb (1736 – 1806) pada umumnya dianggap sebagai orang yang menemukan solusi akhir masalah tersebut. Investigasi yang secara cepat telah memperluas ilmu kekuatan bahan adalah masalah-masalah lain yang berkaitan dengan balok, seperti efek torsi. Sebagaimana akan diuraikan berikut ini, banyak di antara konsep-konsep tersebut (yang pada awalnya dikembangkan dalam kaitan dengan balok) yang pada dasarnya dapat diterapkan pada elemen struktural lainnya. Akan tetapi, dalam Bab 6 ini kita akan lebih memusatkan diskusi pada balok.

PRINSIP-PRINSIP UMUM

6.2.1 Balok pada Gedung

Ada sedikit gedung yang konstruksinya tidak menggunakan balok. Selain balok yang telah kita kenal sebagai bagian dari sistem struktural utama, ada komponen gedung lain (misalnya struktur tangga) yang menurut tinjauan struktur juga dapat disebut sebagai balok.

Apabila digunakan untuk membentuk sistem struktural pada gedung, elemen balok adalah yang paling banyak digunakan dengan pola berulang. Pada umumnya pola ini menggunakan susunan hierarki balok. Elemen pemikul-beban yang merupakan permukaan bidang (misalnya papan, lantai) mempunyai kemampuan membentang terbatas sehingga pada umumnya ditumpu pada jarak-jarak tertentu oleh elemen

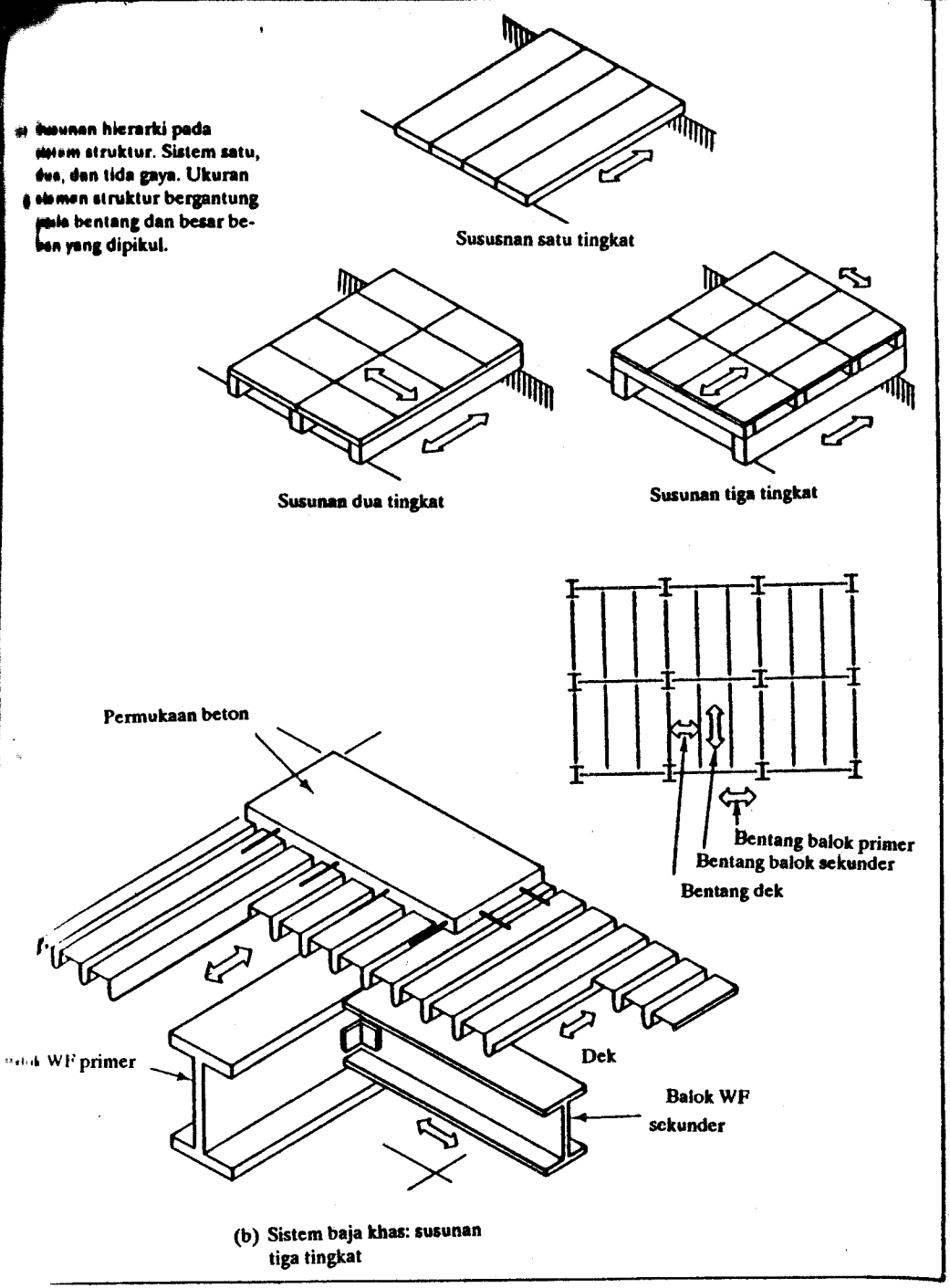
struktur sekunder yang berbentang lebih besar sehingga terbentuk sistem dua
Elemen-elemen ini ditumpu oleh balok kolektor sehingga terbentuk sistem
tingkat. Beban yang bekerja pada permukaan mula-mula dipikul oleh elemen
mukaan, diteruskan ke elemen struktur sekunder, untuk selanjutnya diteruskan
kolektor atau tumpuan. Semakin besar beban, yang disertai dengan bertambahnya
panjang, pada umumnya akan memperbesar ukuran atau tinggi elemen struktur
(Gambar 6-2).

Tentu saja banyaknya tingkat pada susunan hierarki dapat tidak sama dengan
yang disebutkan di atas. Susunan tiga tingkat biasanya yang maksimum digunakan.
Susunan satu maupun dua tingkat juga umum digunakan. Untuk ukuran bentang
tertentu, jelas bahwa pada umumnya sistem dengan berbagai tingkat dapat digunakan.
Ukuran elemen struktur untuk setiap sistem dapat ditentukan berdasarkan analisis
bentang, beban, dan material. Akan tetapi, meskipun setiap susunan dapat mempunyai kemampuan layan, yang layak digunakan adalah sistem yang meninjau
juga kriteria lain seperti efisiensi, kemudahan pelaksanaan, dan biaya. Apabila suatu
kriteria dapat diukur (misalnya volume material), maka prosedur pilihan akan
terdiri atas analisis susunan pemikul beban, penentuan ukuran serta karakteristik
elemen struktur sesuai dengan prosedur desain, dan pembandingan pilihan susunan
tersebut berdasarkan kriteria tadi.

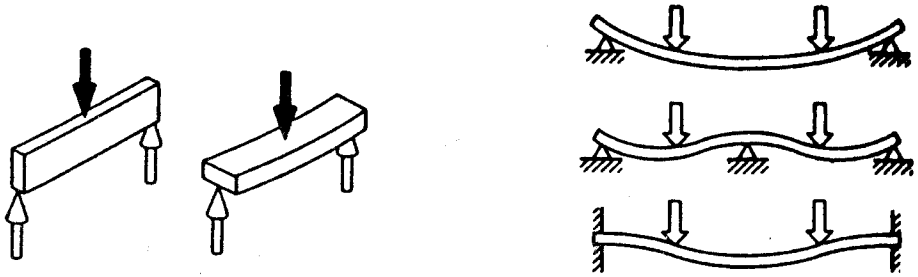
Proses penentuan ukuran balok yang telah diketahui bentangnya merupakan
proses yang relatif langsung dan terdiri atas penentuan beban yang bekerja padanya
pencarian sifat material yang diperlukan, geometri penampang melintang, dan dimensi lainnya, sedemikian rupa sehingga balok tersebut mampu memikul kondisi pembebanan yang ditentukan.

Tegangan aktual yang timbul pada balok bergantung pada besar dan distribusi
material pada penampang melintang elemen struktur. Pada dasarnya semakin besar
balok, semakin kecil tegangannya. Cara mengorganisasi material tersebut di dalam
ruang merupakan hal penting (Gambar 6-3). Elemen struktur segiempat tipis mempunyai kemampuan memikul beban yang lebih besar apabila beban tersebut segaris
dengan tinggi yang maksimum. Bukan luas saja yang penting distribusi pun penting.
Pada umumnya, semakin tinggi suatu elemen, semakin kuat kemampuannya untuk
memikul lentur. Ukuran yang disebut *momen inersia (I)* dapat digunakan untuk
menentukan kekuatan elemen struktur terhadap lentur. Momen inersia ini bergantung pada bentuk dan ukuran penampang melintang (lihat Bab 6.3).

Variabel dasar penting dalam desain adalah besar beban yang ada, jarak antara
beban-beban, dan perilaku kondisi tumpuan balok. Kondisi tumpuan ini sangat
penting. Elemen struktur yang ujung-ujungnya dijepit lebih kaku daripada yang
ujung-ujungnya dapat berputar bebas. Balok yang ujung-ujungnya dijepit, misalnya
dapat memikul beban terpusat di tengah bentang dua kali lebih besar daripada balok
yang sama yang tidak dijepit ujungnya. Balok yang *menerus* di atas banyak tumpuan
juga sering digunakan karena memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan
balok di atas tumpuan-tumpuan sederhana. Akan tetapi, ada pula kerugiannya
seperti akan dibahas pada Bab 8.



GAMBAR 6-2 Balok pada gedung.



(a) Apabila arah beban sama dengan arah tinggi maksimum balok, kapasitas pikulnya akan lebih besar daripada sebaliknya.

(b) Dengan membuat balok menerus di atas beberapa tumpuan atau dengan menahan ujung-ujungnya, kekakuan dan kapasitas pikul bebannya akan meningkat.

GAMBAR 6-3 Faktor-faktor penting dalam desain balok.

6.2.2 Tegangan dan Deformasi pada Penampang Melintang

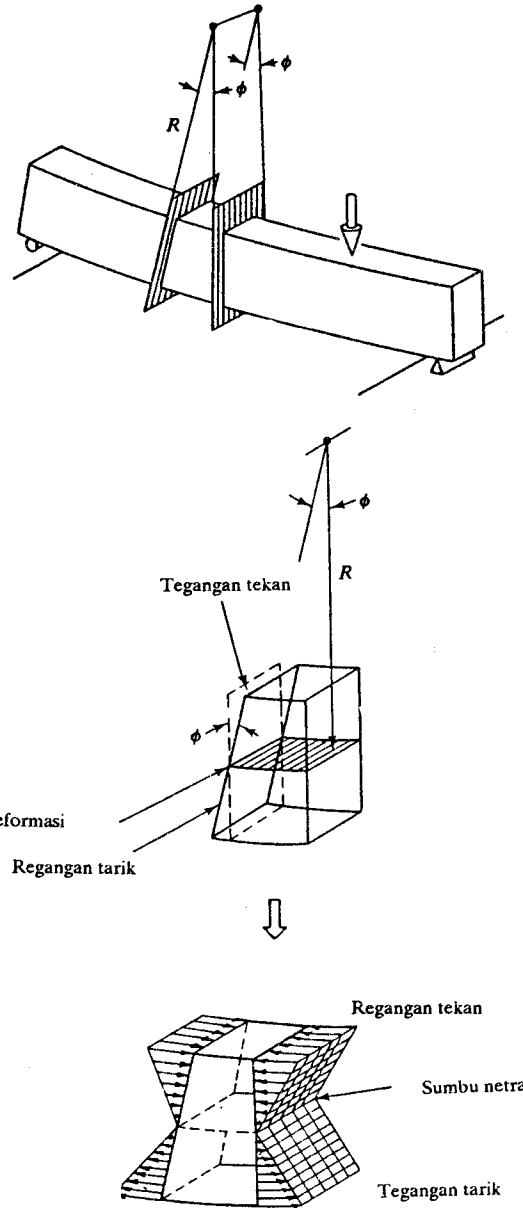
Perhatikan elemen struktur balok yang terlihat pada Gambar 6-4. Telihat bahwa di setiap penampang melintang balok, aksi dari beban menyebabkan timbulnya pola deformasi di mana ada serat balok yang memanjang dan ada yang memendek. Pada balok tersebut, serat-serat di bagian atas balok mengalami perpendekan sementara yang di bagian bawah balok mengalami perpanjangan. Apabila kita meninjau lebih lanjut deformasi balok pada suatu penampang melintangnya [lihat Gambar 6-4(b)], jelas bahwa deformasi itu berubah secara linear atau hampir linear dari perpanjangan maksimum ke perpendekan maksimum di mana kedua-duanya terletak pada serat-serat tepi. Dengan demikian, harus ada serat di daerah tengah balok di mana tidak terjadi perpanjangan maupun perpendekan. Serat ini sangat penting diketahui dalam mempelajari balok, dan kita sebut *sumbu netral* balok. Untuk penampang melintang simetris, misalnya balok segiempat, bidang netral (atau sumbu netral) tersebut terletak pada setengah tinggi balok. Tidak demikian halnya apabila penampangnya tidak simetris. Pada bagian lain buku ini akan dibuktikan bahwa sumbu netral ini juga merupakan *pusat berat* (lihat Lampiran 2) penampang melintang.

Salah satu alasan utama mempelajari deformasi balok adalah fakta bahwa besar tegangan yang timbul pada balok akibat beban mempunyai hubungan dengan deformasi. Apabila balok tersebut terbuat dari material *elastik linear*, maka tegangan yang timbul akibat lentur akan berbanding langsung dengan deformasi yang ada. Dengan demikian, pada balok tersebut, tegangan akibat beban akan maksimum pada serat-serat terluar balok, dan mengecil secara linear menuju nol pada sumbu netral. Tegangan tarik adalah yang menimbulkan perpanjangan sedangkan tegangan tekan yang menimbulkan perpendekan. Dengan memperhatikan Gambar 6-4 akan terlihat bahwa

(a) Beban yang diberikan tegak lurus terhadap sumbu batang menyebabkan batang melentur.

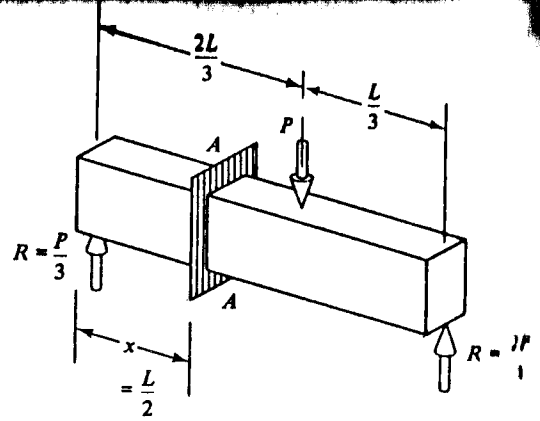
(b) Besar kelengkungan (1/R) yang timbul pada balok pada suatu penampang berbanding langsung dengan besar momen eksternal yang ada pada penampang. Deformasi aktual balok sehubungan dengan kelengkungan ini bervariasi secara linear dari nilai maksimum tarik di satu muka balok ke nilai tekan maksimum di muka lainnya.

(c) Tegangan yang timbul akibat lentur (untuk material elastis linear) berbanding langsung dengan besar deformasi yang ada. Bidang tegangan nol disebut sumbu netral penampang.



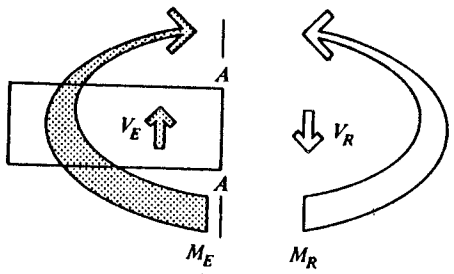
GAMBAR 6-4 Tegangan lentur pada balok. Bagian (a) dan (b) menunjukkan bentuk umum deformasi akibat beban eksternal. Bagian (b) menunjukkan deformasi yang ada pada penampang melintang, dan (c) mengilustrasikan distribusi tegangan lentur pada penampang yang sama

(a) Balok yang dibebani

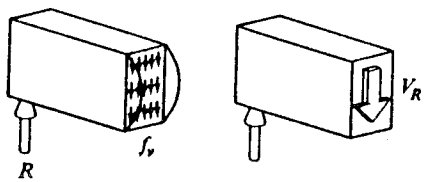


(b) Efek total dari sistem gaya eksternal terhadap bagian balok menghasilkan gaya geser ke atas V_E dan momen rotasional M_E. Keseimbangan geser dan momen eksternal dengan berturut-turut geser dan momen internal memberikan:

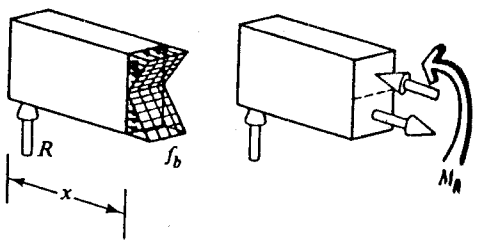
$\Sigma F_y \quad V_E = P/3$
$\Sigma M_x \quad M_E = (P/3)x$
$di\ x = L/2$
$M_E = PL/6$



(c) Tegangan geser vertikal timbul pada penampang dan bekerja di muka penampang memberikan gaya geser tahanan V_R.



(d) Tegangan lentur yang timbul pada muka penampang menghasilkan kopel yang dapat memberikan momen tahanan internal M_R.



GAMBAR 6-5 Mekanisme pemikul-beban dasar pada balok.

deformasi yang timbul pada penampang, jadi juga tegangan lenturnya, mempunyai hubungan dengan ***kelengkungan (curvature, 1/R)*** balok pada titik itu. Apabila jari-jari kelengkungan (R) balok menjadi kecil, maka kelengkungan ($1/R$) balok menjadi besar, dan tegangan serta deformasi pada balok juga membesar. Apabila jari-jari (R) membesar (yaitu balok semakin datar), maka kelengkungan, deformasi, serta tegangan akan mengecil.

Karena tegangan lentur mencapai maksimum pada serat-serat terluar balok, maka pada umumnya desain balok ditentukan dengan memusatkan material pada serat-serat tersebut. Sebagaimana akan dibuktikan pada bagian lain bab ini, balok tinggi dengan material sebanyak mungkin pada lokasi jauh dari sumbu netral akan lebih efisien dibandingkan dengan jenis balok lainnya.

6.2.3 Mekanisme Pemikul-Baban Dasar

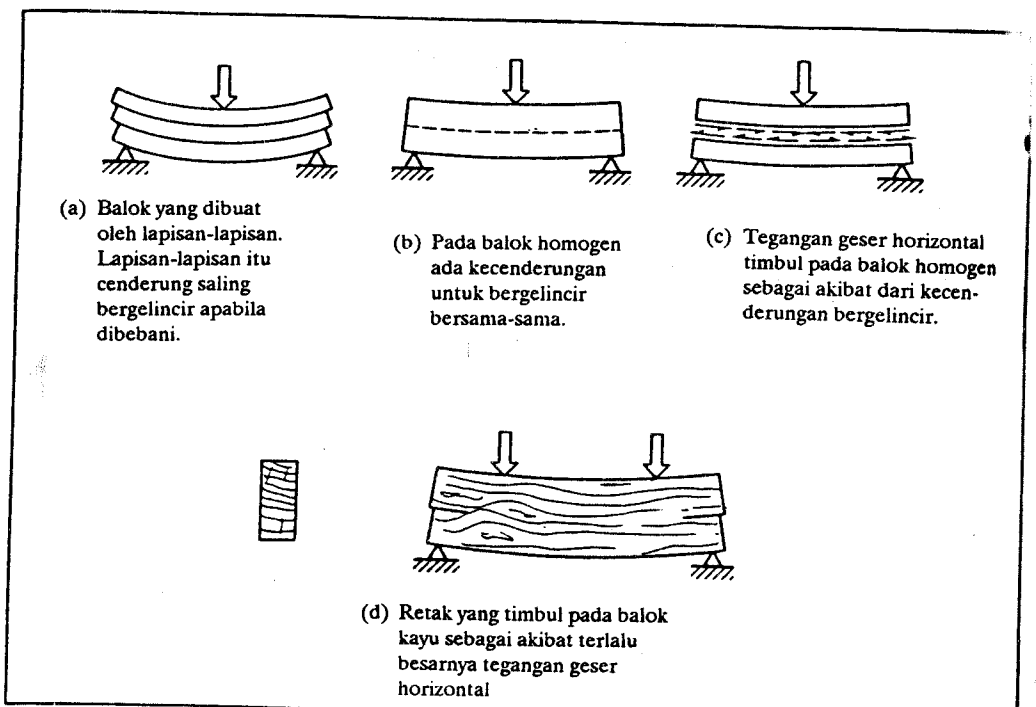
Besar aktual deformasi, tegangan lentur, serta kelengkungan yang ada pada suatu penampang bergantung pada besar momen lentur yang timbul pada penampang tersebut sebagai akibat aksi beban eksternal pada balok. Momen lentur yang timbul dapat diperoleh dengan mempelajari keseimbangan seluruh struktur maupun sebagian daripadanya. Perhatikan ilustrasi pada Gambar 6-5. Dengan memperhatikan bagian struktur sebelah kiri potongan *A-A*, jelaslah bahwa efek total gaya-gaya eksternal yang bekerja pada bagian struktur tersebut menghasilkan momen rotasional $PL/6$ dan gaya ke atas $0{,}33P$. Seperti telah disebutkan pada Bab 2.4.3, gaya serta momen ini berturut-turut disebut *gaya geser eksternal* dan *momen lentur eksternal.* Agar keseimbangan pada bagian struktur tersebut tercapai, harus ada gaya-gaya-dalam pada struktur, yang efeknya menghasilkan momen dan gaya vertikal sama besar dengan yang eksternal, tetapi berlawanan arah dengan yang eksternal. Momen internal serta gaya geser internal ini diperlihatkan pada Gambar 6-5/b).

Pada rangka batang telah dibuktikan bahwa geser dan momen itu dihasilkan oleh gaya-gaya aksial pada setiap batang (lihat Bab 4.3). Momen tahanan internal diberikan oleh kopel ($\rightleftarrows$) dari gaya-gaya batang. Pada balok, tahanan momen internal juga dihasilkan oleh kopel, tetapi kopel ini berasal dari dua gaya yang masing-masing merupakan resultan dari tegangan tarik dan tegangan tekan pada penampang tersebut. Dengan demikian, kopel ini merupakan hasil dari dua gaya (tarik dan tekan) pada satu penampang yang mempunyai jarak yang disebut *lengan momen* [lihat Gambar 6.5(d)]. Tidak seperti pada rangka batang, lengan momen pada balok tidak diketahui terlebih dahulu karena besaran ini bergantung pada lokasi resultan gaya tarik dan tekan pada penampang itu, yang berarti pula bergantung pada distribusi tegangan tarik dan tekan serta bentuk penampang tersebut. Cara mendapat lengan momen akan dibahas pada bagian lain bab ini.

Tegangan lentur yang baru saja kita bahas, yang merupakan respons terhadap momen eksternal, bekerja secara horizontal sehingga tidak dapat memberikan kontribusi apa pun dalam mengimbangi gaya geser eksternal. Gaya geser eksternal diimbangi oleh *tegangan geser* yang bekerja di muka penampang, seperti terlihat pada Gambar 6-5(c). Distribusi tegangan geser di suatu penampang merupakan hal yang cukup rumit, dan akan dibahas pada bagian akhir bab ini di mana akan ditunjukkan bahwa

nilainya akan maksimum pada sumbu netral penampang serta mengecil secara t linear kepada serat terluar. Hal penting yang perlu diingat adalah bahwa efek t dari tegangan geser tersebut menghasilkan gaya geser vertikal yang mengimbangi ga geser eksternal.

Selain tegangan geser berarah vertikal yang telah disebutkan di atas, ada pu tegangan geser horizontal pada balok. Adanya tegangan geser ini dapat dengan mud divisualisasikan dengan memperhatikan dua balok. Balok yang pertama menggunak bidang-bidang yang tak dihubungkan (serupa dengan tumpukan kartu), dan bal yang lainnya terbuat dari satu material utuh (lihat Gambar 6-6). Apabila dibeba pada balok yang pertama akan terjadi gelincir di antara bidang-bidang pembentu balok. Pada balok yang utuh tidak terjadi gelincir. Hal ini disebabkan oleh adany *tegangan geser horizontal* yang dapat mencegah gelincir. Selama materialnya mamp memikul tegangan geser horizontal ini, bidang-bidang yang bersebelahan pada bal utuh tidak akan menggelincir, dan balok tersebut tetap utuh. Beberapa bahan, mi salnya kayu, mempunyai kelemahan terhadap jenis tagangan ini (lihat Gamb 6-6(d)]. Menarik untuk diperhatikan bahwa nilai numerik tegangan geser horizont pada suatu titik sama dengan nilai numerik tegangan geser yang bekerja dalam ara vertikal pada titik yang sama. Fenomena ini akan dibahas lebih lanjut pada bagi lain bab ini.



(a) Balok yang dibuat oleh lapisan-lapisan. Lapisan-lapisan itu cenderung saling bergelincir apabila dibebani.

(b) Pada balok homogen ada kecenderungan untuk bergelincir bersama-sama.

(c) Tegangan geser horizontal timbul pada balok homogen sebagai akibat dari kecenderungan bergelincir.

(d) Retak yang timbul pada balok kayu sebagai akibat terlalu besarnya tegangan geser horizontal

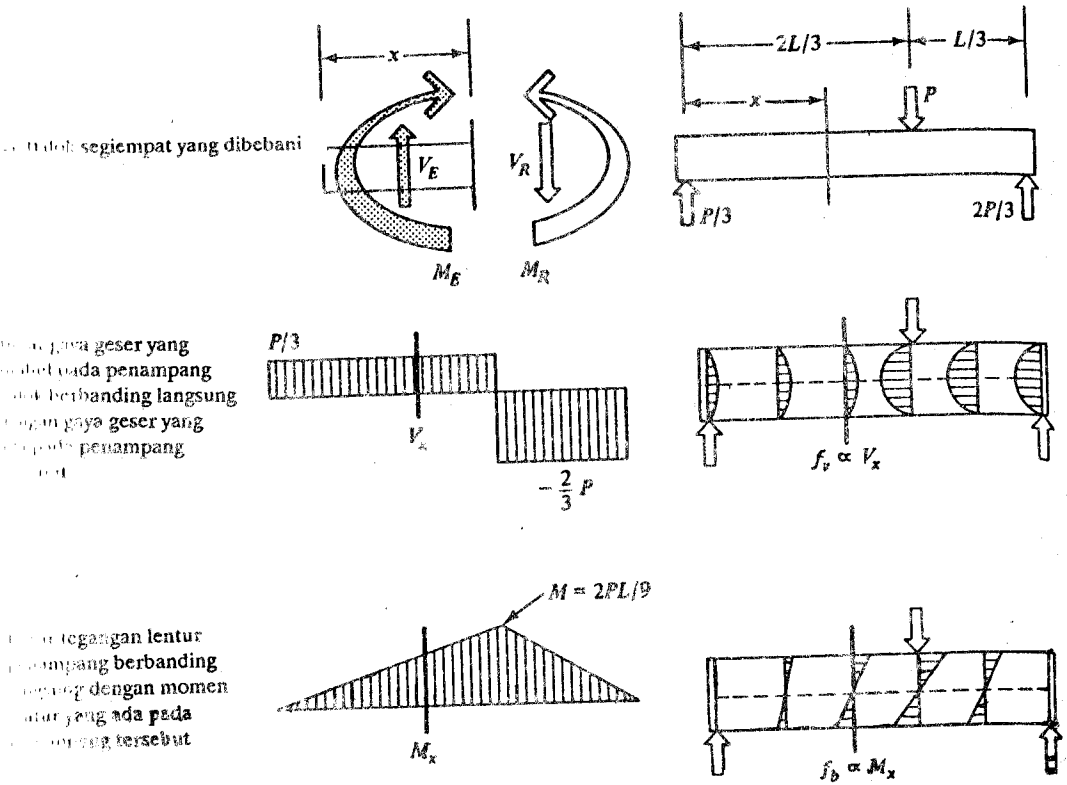
GAMBAR 6-6 Tegangan geser horisontal pada balok.

Selain tegangan lentur, tegangan geser vertikal, dan tegangan horizontal ada hal-hal lain yang juga penting dalam mempelajari balok, yaitu tegangan torsional, tegangan gabungan, pusat geser balok, tegangan utama, dan defleksi balok. Semuanya dibahas pada Bab 6 ini.

6.2.4 Distribusi Gaya pada Balok

Sebelum ini telah kita bahas tegangan-tegangan yang timbul pada penampang balok. Menarik pula untuk mempelajari distribusi tegangan-tegangan tersebut di sepanjang balok. Karena tegangan pada suatu penampang bergantung pada besar dan arah momen serta gaya geser eksternal pada penampang tersebut, maka distribusi tegangan di sapanjang balok dapat diperoleh dengan mempelajari distribusi gaya geser dan momen.

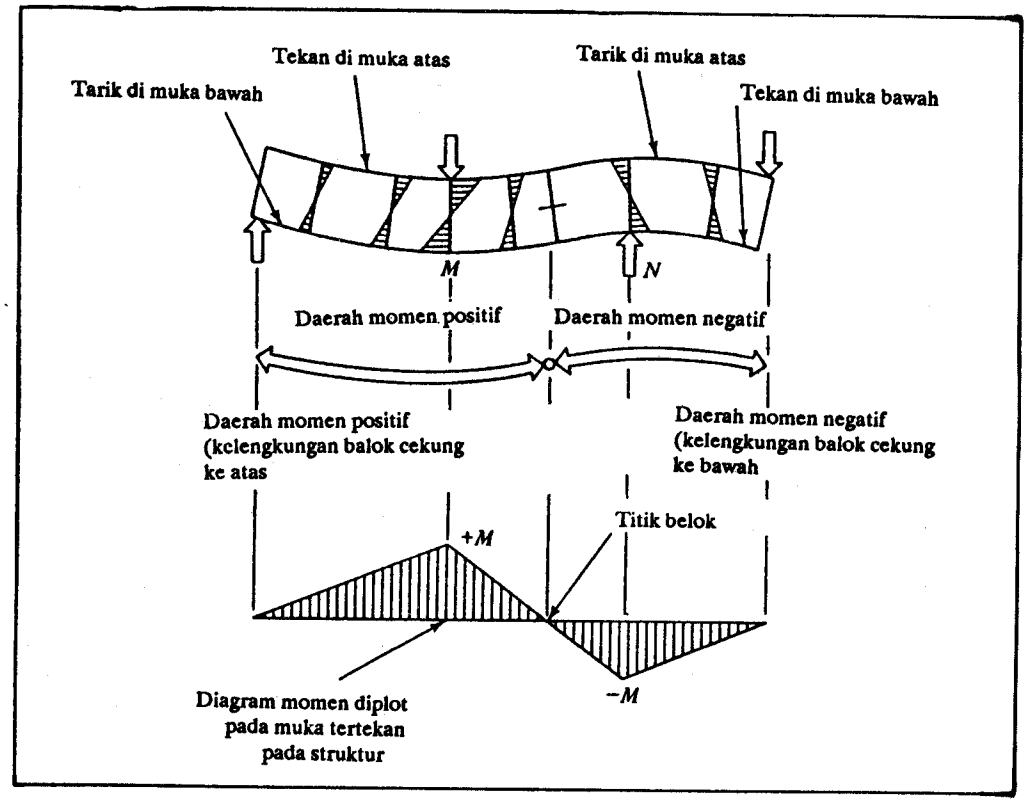
Prinsip dasar mencari distribusi gaya geser dan momen telah dibahas pada Bab 2.4.3. Di sana telah disebutkan bahwa apabila keseimbangan bagian balok ditinjau, efek gaya eksternal (termasuk juga reaksi) menghasilkan efek rotasional (momen eksternal, M_E) terhadap potongan yang ditinjau serta gaya vertikal (gaya geser eksternal, V_E), dan kedua-duanya diimbangi oleh momen dan geser internal ($M_R = M_E$ dan $V_R = V_E$). Jelas bahwa besar gaya geser dan momen tersebut bergantung



GAMBAR 6-7 Distribusi gaya dan tegangan pada balok.

pada lokasi potongan yang ditinjau. Jadi, distribusi momen dan geser ini dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan bagian-bagian yang berbeda pada struktur dan menghitung momen serta geser untuk setiap potongan tersebut. Gambar yang menunjukkan distribusi momen dan gaya geser di seluruh struktur berturut-turut disebut *diagram momen* dan *diagram gaya geser*. Diagran tersebut telah dibahas pada Bab 2.4.3

Gambar 6-7 memperlihatkan hubungan umum antara distribusi momen dan gaya geser pada struktur dengan tegangan lentur dan tegangan geser yang timbul. Gambar 6-8 memperlihatkan hubungan antara distribusi momen dan tegangan lentur pada balok yang mempunyai titik belok (inflection point).



GAMBAR 6-8 Daerah momen positip dan negatip pada balok.

6.3 ANALISIS BALOK

Bagian ini membahas secara ringkas topik-topik yang umum dijumpai secara lebih rinci pada buku-buku mengenai kekuatan bahan. Topik-topik berikut ini, yang berhubungan dengan analisis balok yang terbuat dari material elastik linear, terdiri atas (1) tegangan lentur, (2) tegangan geser, (3) tegangan tumpu, (4) tegangan gabungan, (5) tegangan torsional, (6) pusat geser, (7) tegangan utama, dan (8) defleksi.

Tujuan pembahasan topik-topik pada bab ini antara lain adalah mempelajari hubungan dasar yang ada di antara variabel-variabel tersebut. Sebagai contoh, akan dibahas pada faktor apa saja momen lentur pada suatu titik bergantung, dan bagaimana hubungan di antara faktor-faktor tersebut. Diskusi di sini tidak bermaksud membahas semua hubungan yang ada. Hanya beberapa yang penting yang akan dibahas. Hal ini dimaksudkan agar pembaca terpacu untuk menurunkan hubungan lainnya. Pembaca dianjurkan mempelajari referensi lain, khususnya buku-buku tradisional, mengenai kekuatan bahan dimana topik-topik itu dipelajari secara lebih mendalam.[1]

6.3.1 Tegangan Lentur

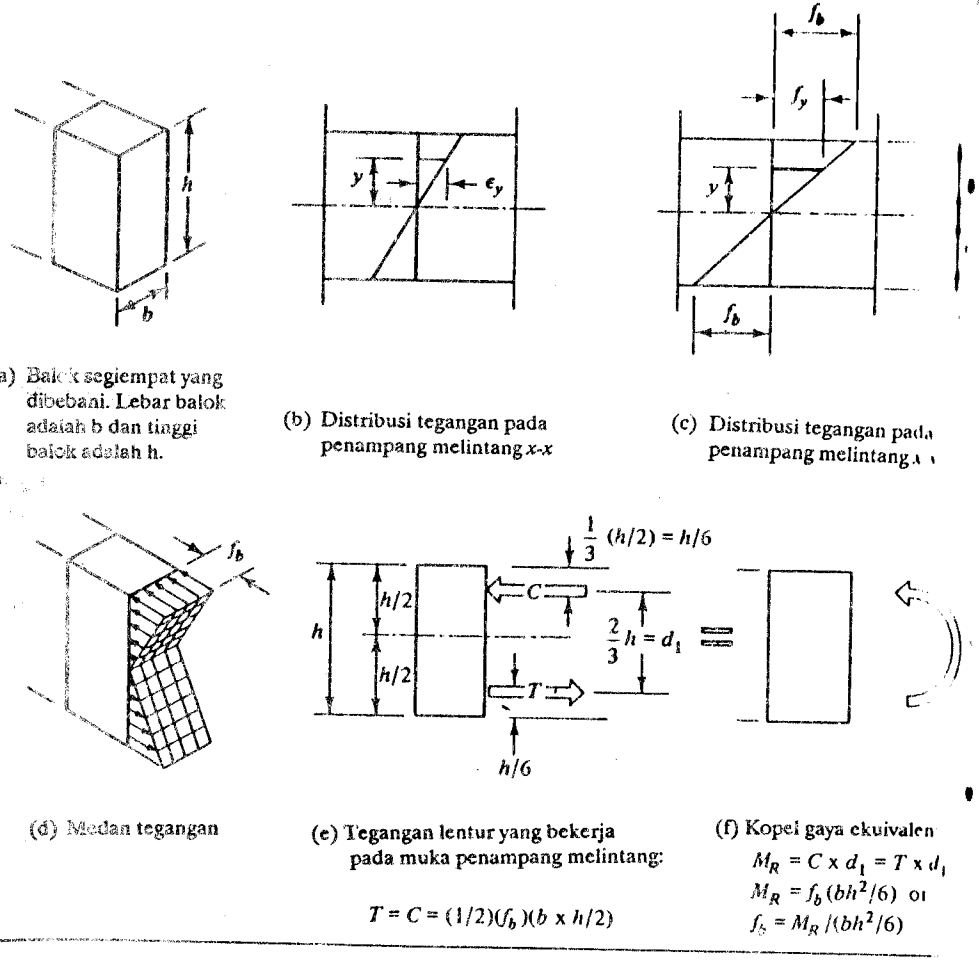
Pendahuluan. Seperti telah disebutkan pada Bab 6.2, tegangan lentur timbul pada balok sebagai respons terhadap momen lentur eksternal pada satu titik pada balok tersebut.

Sebelum melihat bagaimana menentukan tegangan lentur secara kuantitatif, di sini akan diulang kembali faktor-faktor yang menentukan tegangan lentur pada balok. Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar 6-9. Distribusi tegangan yang digambarkan didasarkan atas asumsi bahwa tegangannya bergantung linear pada deformasi, atau dengan perkataan lain, material yang digunakan adalah elastis linear. Besar tegangan lentur (f_y) yang ada pada suatu titik bergantung pada momen eksternal (M) pada penampang tersebut. Besar f_y juga harus sebanding dengan jarak (y) lokasi titik yang ditinjau ke sumbu netral balok. Tentu saja tegangan lentur (fy) berbanding terbalik dengan besaran yang bergantung pada ukuran dan bentuk balok itu sendiri. Apabila ukuran balok bertambah, maka tegangan pada suatu titik pada balok akan berkurang untuk suatu harga momen. Misalnya kita definisikan besaran tersebut sebagai I (besaran ini umum disebut sebagai *momen inersia*). Tegangan lentur hanya bergantung pada faktor-faktor tersebut di atas. Dengan demikian, misalnya, tegangan lentur tidak dipengaruhi oleh jenis material yang digunakan. Aman atau tidaknya suatu elemen struktur untuk suatu pembebanan tertentu memang memerlukan tinjauan kekuatan material, tetapi hal ini merupakan masalah lain yang akan dibahas pada bagian lain buku ini.

Karena tegangan lentur (f_y) berbanding langsung dengan momen (M), berbanding langsung dengan parameter lokasi (y), dan berbanding terbalik dengan besaran penampang (I), maka tegangan tersebut dapat ditulis sebagai

$$f_y \Longrightarrow \left(M, y, \frac{1}{I}\right)$$

1 – Lihat misalnya Ferdinand L. Singer, *Strength of Materials*, ed. ke-2 Harper & Row, Publishers, New York, 1962.



(a) Balok segiempat yang dibebani. Lebar balok adalah b dan tinggi balok adalah h.

(b) Distribusi tegangan pada penampang melintang x-x

(c) Distribusi tegangan pada penampang melintang x-x

(d) Medan tegangan

(e) Tegangan lentur yang bekerja pada muka penampang melintang:

$T = C = (1/2)(f_b)(b \times h/2)$

(f) Kopel gaya ekuivalen

$M_R = C \times d_1 = T \times d_1$

$M_R = f_b(bh^2/6)$ or

$f_b = M_R/(bh^2/6)$

GAMBAR 6-9 Tegangan lentur pada balok segi empat.

Karena :

apabila M membesar, maka f_y membesar,
apabila y membesar, maka f_y membesar,
apabila I membesar, maka f_y mengecil,

maka :

$$f_y \Longrightarrow \frac{My}{I}$$

Perhatikan bahwa apabila satuan tegangan adalah lb/ft^2, satuan M adalah in-lb, dan satuan y adalah in., maka satuan I adalah in.^{4}. Dengan demikian, rumus tegangan lentur My/I secara dimensional sudah benar. Apabila satuan SI digunakan, maka satuan tegangan f adalah N/mm^2 atau MPa, satuan M adalah N–mm, dan satuan y

adalah mm. Jadi, satuan I haruslah mm^4.

Pada pembahasan di atas kita tidak dapat meninjau lebih lanjut apa yang dimaksud dengan I. Hal ini dapat dilakukan dengan perhitungan keseimbangan. Berikut ini akan diilustrasikan prosedur untuk memperoleh tegangan lentur pada titik sembarang pada balok segiempat, dan akan diuraikan apa arti I sebenarnya.

Balok Segiempat. Tegangan tekan dan tegangan tarik mempunyai resultan gaya tekan dan tarik pada suatu penampang balok. Kedua gaya ini merupakan kopel ($\Longrightarrow$) yang berfungsi sebagai momen tahanan internal (M_R). Momen ini mengimbangi efek rotasional dari momen eksternal (M_E) pada penampang tersebut. Momen tahanan internal ini dapat dinyatakan dalam tegangan lentur anu (yang belum diketahui) pada penampang itu. Tegangan internal anu akibat kopel gaya internal dapat diperoleh dengan menuliskan ekspresi $M_R = M_E$ pada penampang yang sama. Di sini prosedurnya diuraikan untuk penampang balok segiempat. Untuk jenis penampang lainnya pembaca dapat melihat Lampiran A-4.

Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar 6-9. Tegangan tekan yang bekerja pada setengah bagian atas balok pada dasarnya ekuivalen dengan satu gaya C, yang bekerja seperti terlihat pada Gambar 6-9(b). Besar gaya ini merupakan tegangan tekan rata-rata dikalikan luas di mana tegangan tekan tersebut bekerja (karena gaya = tegangan rata-rata x luas). Lokasinya dapat ditentukan berdasarkan distribusi tegangan yang ada. Untuk distribusi tegangan segitiga, lokasi tersebut ada pada titik seperti tinggi dari alas segitiga seperti terlihat pada Gambar 6-9(d). (Lihat pembahasan mengenai *pusat berat* pada Lampiran 2.) Dengan cara serupa, untuk tegangan tarik ada resultannya, yaitu gaya tarik T yang bekerja seperti terlihat pada Gambar 6-9(d). Momen tahanan internal pada balok tersebut merupakan kopel dari gaya tarik dan gaya tekan di atas. Dengan menyamakan momen tahanan dan momen eksternal, akan diperoleh tegangan pada serat terluar.

Gaya ekuivalen:

gaya tekan = tegangan rata-rata x luas

$$C = \tfrac{1}{2} f_b \times \left(b \times \frac{h}{2}\right) = \frac{f_b bh}{4}$$

gaya tarik = tegangan rata-rata x luas

$$T = \tfrac{1}{2} f_b \times \left(b \times \frac{h}{2}\right) = \frac{f_b bh}{4}$$

lengan momen = jarak antara C dan T.

Gaya-gaya T dan C bekerja pada pusat berat tegangan masing-masing (tarik dan tekan) seperti terlihat pada Gambar 6-9.

$$\text{lengan momen} = \left(\frac{2}{3} \times \frac{h}{2}\right) + \left(\frac{2}{3} \times \frac{h}{2}\right) = \frac{2h}{3} = d_1$$

$$\text{momen tahanan internal} = C \times d_1 = T \times d_1$$

$$M_R = \left(\frac{f_b h}{4}\right) \times \left(\frac{2h}{3}\right) = f_b\left(\frac{bh^2}{6}\right)$$

Pada ekspresi di atas, momen tahanan internal pada suatu potongan (yang sama dengan momen eksternal pada penampang yang sama) dinyatakan dalam tegangan maksimum f_b dan dimensi balok segiempat. Jadi :

$$f_b = \frac{M}{bh^2/6}$$

Ekspresi umum untuk tegangan lentur f_y pada suatu titik yang berjarak y dari sumbu netral juga dapat diperoleh. Dengan meninjau segitiga yang sebangun, jelaslah bahwa $f_y/y = f_b/c$ (lihat Gambar 6-9). Dengan demikian, $f_b = f_y(c/y)$. Perhatikan bahwa $c = h/2$ untuk penampang segiempat ini. Jadi, f_y kita peroleh :

$$f_y \frac{1}{y} \frac{h}{2} = \frac{M}{bh^2/6}$$

atau

$$f_y = \frac{My}{bh^3/12}$$

Apabila besaran $bh^3/12$ kita sebut momen inersia (I) untuk penampang segiempat maka

$$f_y = \frac{My}{I}$$

Rumus ini adalah rumus lentur yang sama dengan yang telah kita bahas pada awal Bab 6.3.1 ini. Besaran I yang diperoleh di atas hanya berlaku untuk penampang segiempat. Perhatikan bahwa besaran tersebut mempunyai satuan in^4. atau mm^4.

Dengan mempelajari lebih lanjut hasil di atas akan terlihat bahwa tegangan lentur yang timbul pada balok sangat peka terhadap perubahan tinggi balok. Untuk suatu harga momen tertentu, apabila tinggi balok menjadi dua kali (sementara lebarnya tetap), akan menyebabkan tegangan lentur mengecil dengan faktor ¼. Terhadap perubahan lebar penampang, tegangan lentur tidak begitu peka. Misalnya untuk momen dan tinggi penampang konstan, memperlebar penampang dua kali akan memperkecil tegangan lentur menjadi setengahnya. Observasi pada paragraf ini didasarkan atas ekspresi $f = M/(bh^2/6)$.

CONTOH

Sebuah balok kantilever yang berpenampang segiempat dan mempunyai panjang l memikul beban terpusat P pada ujungnya. Hitunglah tegangan lentur maksimum yang ada pada balok tersebut. Anggap bahwa dimensi balok adalah sebagai berikut h = 4 in. (101,6 mm), h = 6 in. (152,4 mm), L = 8 ft (2,44 m). Anggap pula bahwa p = 500 lb (2234 N). Ingat bahwa tegangan lentur maksimum terjadi pada penampang di mana momennya maksimum, khususnya pada titik terluar penampang tersebut.

Solusi :

Momen lentur maksimum:

$$PL = 500 \text{ lb} \times 8 \text{ ft} = 4000 \text{ ft-lb} = 48{,}000 \text{ in.-lb}$$
$$= 2224 \text{ N} \times 2{,}44 \text{ m} = 5426{,}6 \text{ N-m} = 5{,}426 \times 10^6 \text{ N-mm}$$

Tegangan lentur maksimum = f_b pada $y = c$:

$$f_b = \frac{M}{bh^2/6} = \frac{48.000 \text{ in.-lbs}}{4 \text{ in.} \times (6 \text{ in.})^2/6} = 2000 \text{ lb/in.}^2$$
$$= \frac{5{,}426 \times 10^6 \text{ N-mm}}{101{,}6 \text{ mm} \times (152{,}4 \text{ mm})^2/6} = 13{,}79 \text{ N/mm}^2 = 13{,}79 \text{ MPa}$$

Tegangan lentur maksimum dapat pula dicari dengan cara lain, yaitu dengan menggunakan ekspresi tegangan lentur yang lebih umum ($f_y = My/I$):

Momen inersia

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{(untuk penampang segiempat)}$$
$$= \frac{4 \text{ in.} \times (6 \text{ in.})^3}{12} = 72 \text{ in.}^4$$
$$= \frac{101{,}6 \text{ mm} \times (152{,}4 \text{ mm})^3}{12} = 30{,}0 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Tegangan lentur maksimum = f_b di $y = c$:

$$f_b = \frac{My}{I} = \frac{Mc}{I}$$
$$= \frac{(48.000 \text{ in.-lb})(6 \text{ in.}/2)}{72 \text{ in.}^4} = 2000 \text{ lb/in.}^2$$
$$= \frac{(5{,}426 \times 10^6 \text{ N-mm})(152{,}4 \text{ m}/2)}{30{,}0 \times 10^6 \text{ mm}^4} = 13{,}79 \text{ N/mm}^2$$

Teori Umum. Metode dasar yang diuraikan di atas untuk mencari tegangan pada balok dapat diterapkan secara umum. Apabila bentuk penampang melintang, rumit, kita sulit menentukan gaya ekuivalen dari tegangan tekan dan tarik. Untuk memudahkan telah banyak orang memecahkan masalah lentur untuk berbagai penampang, dan rumus lentur yang umum digunakan adalah $f_y = My/I$. Pada formulasi ini, ekspresi umum untuk I dapat dievaluasi untuk berbagai jenis penampang melintang yang dalam buku ini dicantumkan pada Lampiran 4. Pada umumnya, prosedur yang digunakan untuk menurunkan ekspresi tersebut serupa dengan pada penampang segiempat. Dengan demikian, momen tahanan pada berbagai penampang balok ditentukan oleh tegangan yang ada pada penampang tersebut, yang pada gilirannya akan membentuk kopel karena mempunyai lengan momen. Untuk suatu elemen kecil dA, gaya pada elemen tersebut sebanding dengan y [gaya = $f_y dA = f_b(y/c)dA$],

dan momennya adalah gaya dikalikan jarak [momen = $yf_y dA = (f_b I/c)(y^2 dA)$]. Jadi, suku $y^2 dA$ menunjukkan *tahanan momen* yang diberikan oleh luas kecil dA yang berlokasi y dari sumbu netral. Momen tahanan total balok tersebut merupakan jumlah dari kontribusi semua luas kecil atau:

$M = \int_A (f_b/c)(y^2\, dA)$. If I is defined as $\int_A y^2\, dA$, then $M = f_b I/c$ or $f_b = Mc/I$.

Apabila I didefinisikan sebagai $\int_A y^2 dA$, maka $M = f_b I/c$ atau $f_b = Mc/I$, sama dengan yang telah kita peroleh. Suku $\int_A y^2 dA$ menunjukkan momen tahanan total yang diberikan oleh semua luas kecil pada penampang balok. Ekspresi ini di dalam kalkulus sering disebut sebagai *momen kedua (second moment)* dari suatu luasan. Pada mekanika struktur, ekspresi ini disebut *momen inersia* untuk suatu luasan (biasanya luasan ini adalah penampang elemen struktur). Pada Lampiran A-3 besaran ini dibahas secara lebih mendalam, termasuk juga apa artinya dan bagaimana menggunakannya untuk berbagai bentuk balok. Momen inersia balok segiempat yang lebarnya b dan tingginya h, misalnya, mempunyai $I = bh^3/12$ (sama dengan yang telah diperoleh oleh dengan tinjauan keseimbangan).

Ekspresi $f_b = Mc/I$ dapat digunakan untuk menghitung tegangan pada serat terluar yang mempunyai jarak c. Bagi tegangan pada titik sembarang yang jaraknya y, ekspresi tersebut menjadi $f_b = My/I$. Jarak y, seperti juga jarak c, diukur dari sumbu netral balok. Dengan demikian, kita perlu mengetahui secara tepat terlebih dulu di mana letak sumbu netral tersebut. Pada Lampiran 4 dibuktikan bahwa sumbu netral biasanya berimpit dengan *pusat berat* penampang balok. Pusat berat penampang melintang, yang dapat didefinisikan oleh $\int y\, dA$, dapat dipandang sebagai titik di mana geometri luasan (penampang) tersebut seimbang.

Lokasi pusat berat juga merupakan lokasi bidang deformasi dan tegangan lentur sama dengan nol. Pada penampang melintang yang simetris terhadap sumbu horizontal, misalnya bentuk segiempat, bujursangkar, atau lingkaran, pusat berat (dan juga sumbu netral) selalu di tengah tinggi penampang. Deformasi dan tegangan lentur bervariasi secara linear pada elemen struktur dan sebanding dengan jarak dari sumbu netral elemen struktur tersebut.

Penampang Simetris. Beberapa contoh yang menunjukkan aplikasi ekspresi lentur $f_y = My/I$ ditunjukkan berikut ini. Yang pertama adalah pada bentuk segiempat sederhana. Pada contoh ini ditunjukkan prosedur untuk mengetahui apakah balok yang dirancang untuk memikul beban tertentu mempunyai ukuran cukup dalam hal lentur. Hal ini melibatkan perhitungan sederhana mengenai tegangan lentur kritis maksimum yang timbul pada balok (terjadi pada penampang yang mengalami momen maksimum, pada serat terjauh dari sumbu netral), kemudian membandingkan tegangan aktual ini dengan taraf tegangan yang ditentukan dapat diterima untuk material tersebut (biasa disebut *tegangan izin* material tersebut). Seperti telah dibahas pada Bab 2.5, pada tegangan izin terkandung faktor keamanan tertentu. Sudah jelas bahwa apabila tegangan aktual pada titik itu melampaui tegangan izin, maka balok tersebut dipandang mengalami *kelebihan tegangan (overstressed)* pada titik tersebut, dan dipandang tidak dapat diterima.

CONTOH

Suatu balok di atas tumpuan sederhana memikul beban terpusat P di tengah bentangnya. Anggap bahwa dimensi balok adalah sebagai berikut: b = 5 in. (127 mm), h = 10 in. (254 mm), dan L = 10 ft (3048 mm). Anggap pula bahwa P = 4000 lb (17792 kN). Apabila tegangan izin lentur untuk material kayu yang digunakan adalah F_b = 1500 lb/in.^{2} (10,34 N/mm^2 atau 10,34 MPa), apakah balok tersebut mempunyai ukuran cukup terhadap lentur?

Solusi:

Momen lentur maksimum:

$$M = \frac{PL}{4} = \frac{(4000\text{ lb})(10\text{ ft})}{4} = 10.000\text{ ft-lb} = 120.000\text{ in.-lb}$$

$$= \frac{(17{,}792\text{ kN})(3{,}048\text{ m})}{4} = 13{,}56\text{ kN-m} = 13{,}56 \times 10^6\text{ N-mm}$$

Momen inersia:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(5\text{ in.})(10\text{ in.})^3}{12} = 416{,}7\text{ in.}^4$$

$$= \frac{(127\text{ mm})(254\text{mm})^3}{12} = 173{,}4 \times 10^6\text{ mm}^4$$

Tegangan lentur maksimum = f_b *di* $y = c$:

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{(120.000\text{ in.-lb})(10\text{ in./2})}{416.7\text{ in.}^4} = 1440\text{ lb/in.}^2$$

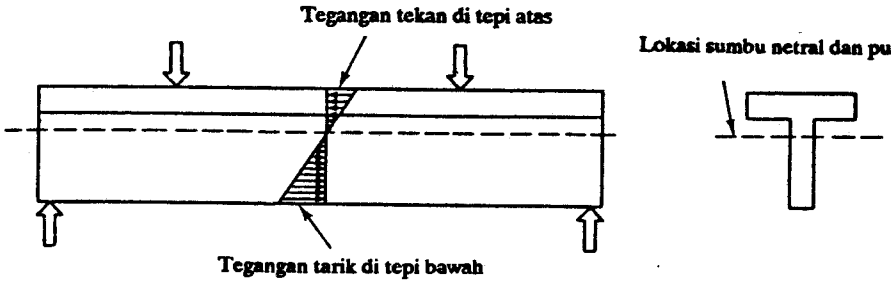
$$= \frac{(13{,}56 \times 10^6\text{ N-mm})(254\text{ mm/2})}{(173{,}4 \times 10^6\text{ mm}^4)} = 9{,}93\text{ N/mm}^2$$

Perhatikan bahwa taraf tegangan yang dihitung tidak bergantung pada jenis material yang digunakan pada balok (tegangan tersebut tidak akan berubah nilainya meskipun materialnya kayu, baja, maupun plastik). Karena material yang digunakan mempunyai tegangan izin lentur 1500 lb/in.^{2}, maka tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan izin, dan desain balok ini dipandang cukup terhadap lentur.

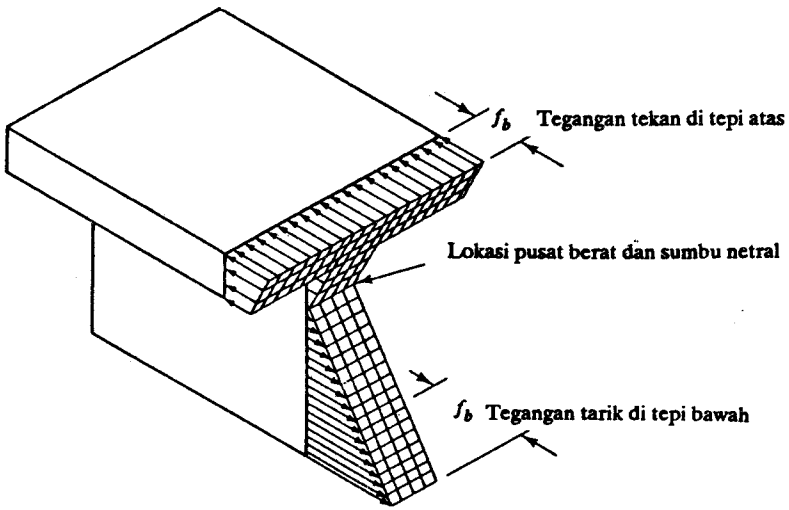
Penampang Tak Simetris. Prinsip-prinsip umum yang telah dibahas di atas dapat juga diterapkan pada penampang tak simetris. Perbedaan nyata antara kedua jenis penampang itu terletak pada lokasi pusat berat, yang pada penampang tak simetris (misalnya bentuk T) tidak tepat di tengah tinggi penampang. Lokasi itu harus ditentukan dengan cara yang dibahas pada Lampiran 2. Perhitungan momen inersia (I) untuk penampang tak simetris juga sedikit lebih runit dibandingkan dengan untuk penampang simetris. Rumus $I = bh^3/12$ hanya berlaku untuk bentuk segiempat. Untuk bentuk lain, seperti penampang tak simetris, kita harus menggunakan rumus umum $I = \int y^2 dA$ yang sering kali perlu disertai penggunaan *teorema sumbu*

sejajar. Pada Lampiran 3 dibahas cara-cara untuk menghitung momen inersia penampang balok yang tak simetris.

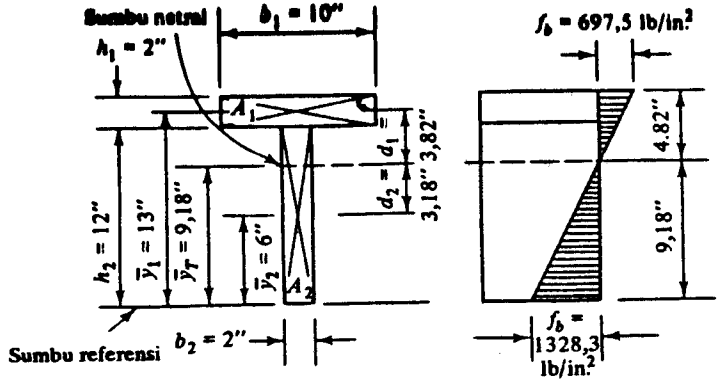
Pada balok T yang terlihat pada Gambar 6-10, pusat berat terletak di dekat flens atas penampang. Deformasi dan tegangan lentur pada balok tersebut masih tetap bervariasi secara linear dan sebanding dengan jarak dari sumbu netral penampang. Hal ini berarti pula bahwa tegangan di tepi atas tidak sama dengan tegangan di tepi bawah. Tegangan di tepi bawah akan lebih besar daripada di tepi atas karena jarak y yang lebih besar ke tepi bawah. Perbedaan tegangan antara keduanya merupakan karakteristik penampang tak simetris. Hal ini mempunyai akibat tertentu dalam desain, seperti akan dibahas pada Bab 6.4



(a) Balok T yang dibebani



(b) Distribusi tegangan lentur balok T



(c) Balok T yang dianalisis pada contoh

GAMBAR 6-10 Distribusi momen lentur pada balok T. Karena penampang melintang ini tak simetrik, maka pusat berat penampang tidak terletak tepat di tengah tinggi penampang. Distribusi tegangan lentur tetap linear dan mempunyai nilai nol di pusat berat (atau sumbu netral). Tegangan di tepi atas tidak sama dengan di tepi bawah.

CONTOH

Tentukan apakah balok T seperti terlihat pada Gambar 6-10 berukuran cukup untuk memikul momen lentur sebesar 120.000 in.-lb. Anggap bahwa tegangan izin lentur material yang digunakan adalah f_b = 1200 lb/in.

Solusi :

Untuk memperoleh tegangan lentur aktual pada penampang balok T, kita dapat menggunakan rumus umum lentur $f_y = My/I$ seperti pada contoh terdahulu. Kita harus mencari I dan y untuk penampang tak simetris ini. Untuk itu, kita hitung dahulu lokasi pusat berat penampang melintang; kemudian, dengan menggunakan teorema sumbu-sejajar, kita hitung momen inersia terhadap pusat berat. Pada Lampiran 3 diterangkan proses umum melakukan hal ini secara lebih rinci.

Lokasi pusat berat :-

Perhatikan bentuk penampang T sebagai susunan dua bentuk segiempat ($A_1 = b_1 \times h_1$ dan $A_2 = b_2 \times h_2$) seperti terlihat pada Gambar 6-10(c). Anggap bahwa sumbu referensi adalah yang terlihat pada gambar tersebut. Misalkan y_T adalah jarak dari tepi bawah ke pusat berat, dan y_1 serta y_2 masing-masing merupakan titik berat segiempat pada gambar tersebut. Dengan demikian:

$$\bar{y}_T = \frac{\sum_i A_i \bar{y}_i}{\sum_i A_i} = \frac{A_1\bar{y}_1 + A_2\bar{y}_2}{A_1 + A_2} = \frac{(2 \text{ in.} \times 10 \text{ in.})(13 \text{ in.}) + (2 \text{ in.} \times 12 \text{ in.})(6 \text{ in.})}{(2 \text{ in.} \times 10 \text{ in.}) + (2 \text{ in.} \times 12 \text{ in.})}$$

$$= 9.18 \text{ in.}$$

Momen inersia:

Misalkan I_T adalah momen inersia seluruh gambar terhadap sumbu berat. Misalkan I_1 dan I_2 berturut-turut adalah momen inersia kedua segiempat terhadap sumbu beratnya, dan d_1 dan d_2 adalah lokasi sumbu-sumbu itu terhadap sumbu berat seluruh bagian penampang. Seperti dijelaskan pada Lampiran 3, I_T dapat diperoleh dengan menggunakan teorema sumbu-sejajar; dengan demikian:

$$I_T = \sum_i (\bar{I}_i + A_i d_i^2)$$

$$= \left[\left(\frac{b_1 h_1^3}{12}\right) + (b_1 h_1)(d_1)^2\right] + \left[\left(\frac{b_2 h_2^3}{12}\right) + (b_2 h_2)(d_2)^2\right]$$

$$= \left[\frac{(10 \text{ in.})(2 \text{ in.})^3}{12} + (10 \text{ in.})(2 \text{ in.})(3{,}82)^2\right] + \left[\frac{(2 \text{ in.})(12 \text{ in.})^3}{12} + (2 \text{ in.})(12 \text{ in.})(3{,}18)^2\right]$$

$$= (6{,}7 + 291{,}9) \text{ in.}^4 + (288{,}0 + 242{,}7) \text{ in.}^4$$

$$= 829{,}3 \text{ in.}^4$$

Tegangan lentur:

Bentuk umum distribusi tegangan yang timbul pada penampang balok T terlihat pada Gambar 6-10(a) dan (b). Tegangan yang terjadi pada tepi atas balok adalah $f_b = My/I$ di mana y adalah 4,82 in. (jarak dari tepi atas ke pusat berat sumbu pada gambar. Dengan demikian :

$$f_b = \frac{My}{I} = \frac{(120.000 \text{ in.-lb})(4{,}82 \text{ in.})}{829{,}3 \text{ in.}^4}$$

$$= 697{,}5 \text{ lb/in.}$$

Tegangan yang terjadi di tepi bawah penampang diperoleh dengan rumus yang sama di mana y = 9,18 in. Dengan demikian:

$$f_b = \frac{My}{I} = \frac{(120.000 \text{ in.-lb})(9{,}18 \text{ in.})}{829{,}3 \text{ in.}^4}$$

$$= 1328{,}3 \text{ lb/in.}^2$$

Tegangan di tepi bawah balok terlihat jauh lebih besar daripada di tepi atas. Hal ini karena tidak simetrisnya penampang. Apabila tegangan izin material yang digunakan pada balok adalah F_b = 1200 lb/in.^{2}, maka balok tersebut kelebihan tegangan di tepi

bawah (yaitu 1328,3 lb/in.^{2} > 1200 lb/in.^{2}). Perhatikan bahwa tegangan di tepi atas masih lebih kecil daripada yang diizinkan. Balok itu dipandang tidak cukup terhadap lentur karena adanya kelebihan tegangan tersebut. Jadi, sebagai rangkuman contoh ini telah kita peroleh :

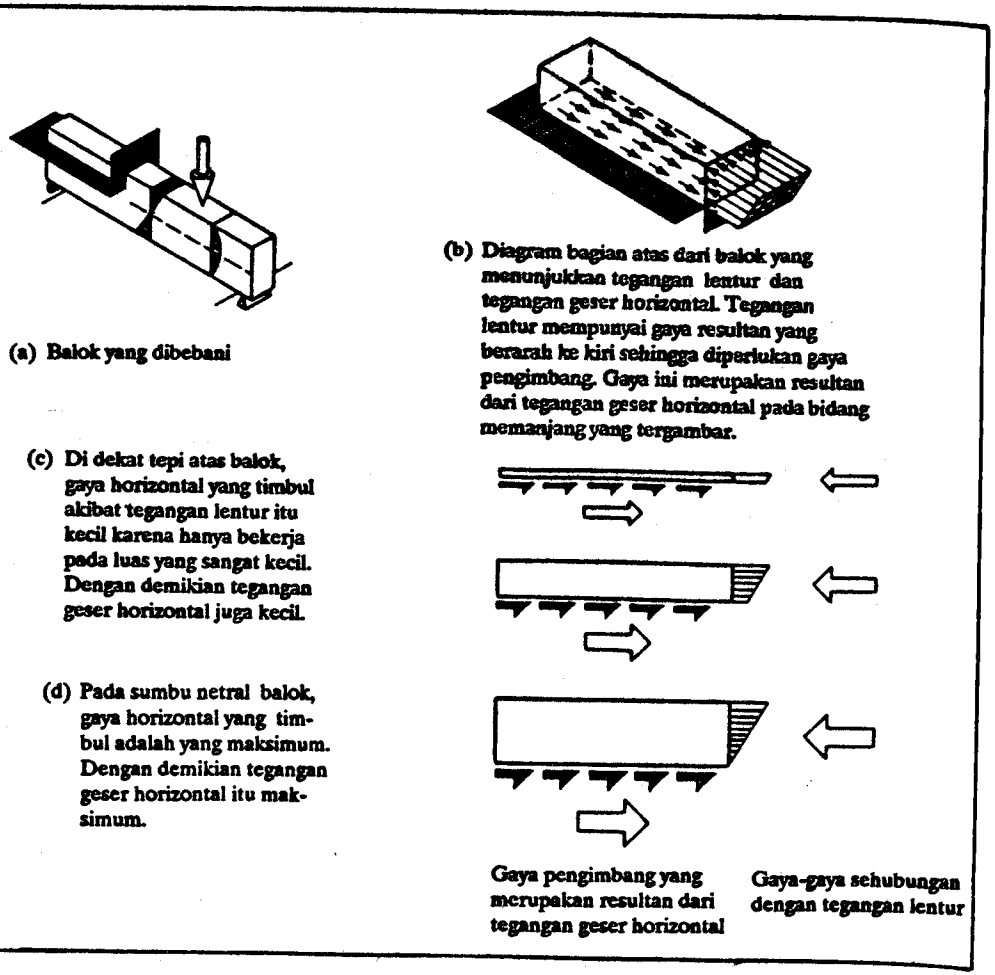
$y_T = 233{,}17$ mm $\quad I_T = 345{,}15 \times 10^6$ mm^4 $\quad f_t = 4{,}81$ N/mm^2 $\quad f_b = 9{,}16$ N/mm^2

6.3.2 Tegangan Geser

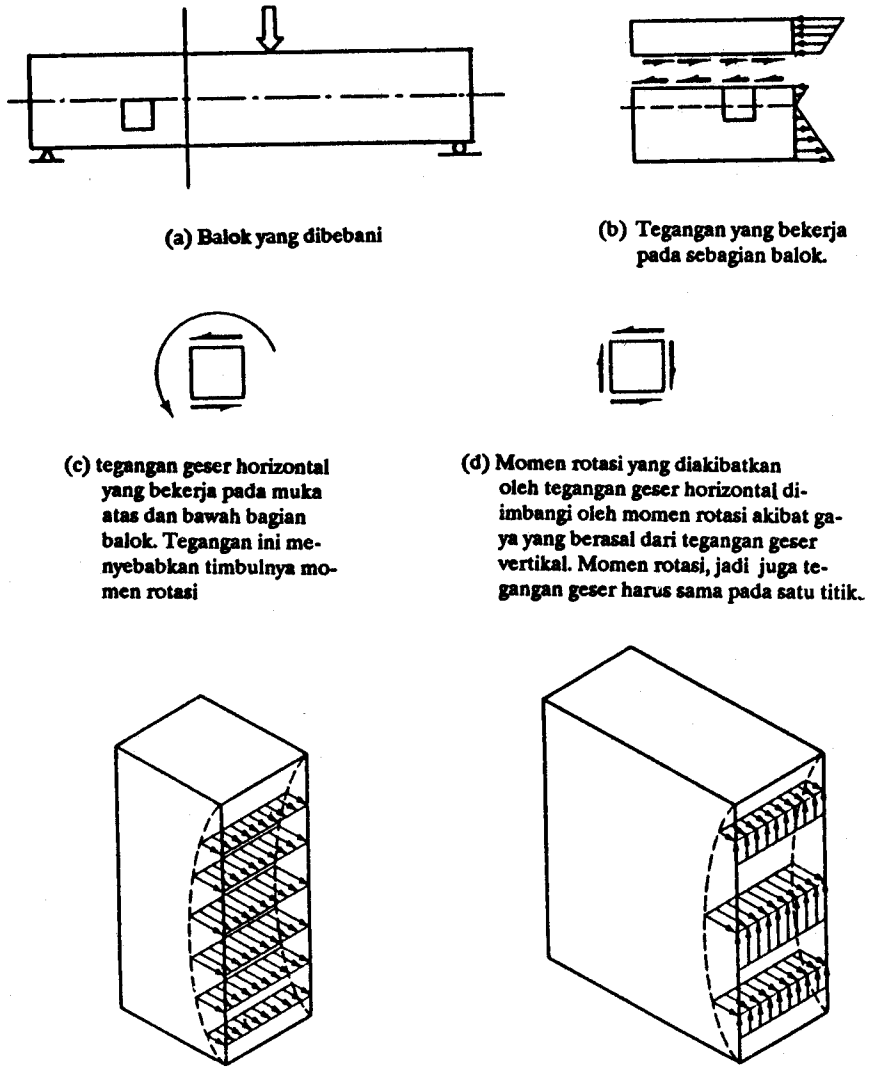
Seperti telah disebutkan pada awal Bab 6 ini, keseimbangan bagian penampang balok dalam arah vertikal diperoleh dengan adanya tegangan geser pada balok. Gaya resultan dari tegangan geser ini, yaitu gaya geser internal $V_R = \int_A f_v \, dA$, sama besar, tetapi berlawanan arah dengan gaya geser eksternal, V_E. Untuk memperoleh pengertian tentang besar dan distribusi tegangan geser vertikal ini, kita tinjau dahulu tegangan geser horizontal yang juga timbul pada balok. Pada contoh dalam Gambar 6-11, besar tegangan horizontal ini dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan horizontal bagian kiri atas balok (ingat bahwa *setiap* bagian struktur harus berada dalam keseimbangan). Agar keseimbangan horizontal terpenuhi, jelaslah bahwa tegangan lentur pada muka kiri penampang yang mempunyai resultan ke kiri harus diimbangi oleh suatu gaya internal yang berarah ke kanan. Gaya yang dimaksud ini merupakan resultan dari tegangan geser horizontal pada muka horizontal balok. Bidang-bidang horizontal lain pada balok itu juga mempunyai tegangan geser yang bermacam-macam besarnya. Pada Gambar 6-11(c) diperlihatkan bidang di dekat tepi atas balok. Gaya dan tegangan yang terjadi lebih kecil daripada pada potongan tengah balok karena tegangan lentur yang bekerja pada luas yang lebih kecil sehingga menghasilkan gaya horizontal yang lebih kecil. Dengan demikian, pada lapisan teratas balok tidak ada gaya ataupun tegangan geser sama sekali. Dapat dibuktikan bahwa distribusi tegangan geser ini bervariasi secara parabolik di seluruh tinggi penampang, dari nilai maksimum pada sumbu berat balok ke nilai nol di tepi atas dan bawah balok. Tegangan geser horizontal ini juga bervariasi di sepanjang bentang balok (khususnya apabila tegangan lentur di sepanjang bentang bervariasi). Ekspresi eksak untuk tegangan geser horizontal balok, yang didasarkan atas konsep serupa dengan yang telah disebutkan terdahulu, dapat ditentukan. Tegangan geser horizontal pada

$$f_v = \frac{VQ}{Ib}$$

lapisan sejauh y dari sumbu netral dapat dibuktikan mempunyai bentuk di mana V adalah gaya geser vertikal pada penampang melintang yang ditinjau, b = lebar di mana lapisan horizontal balok ditinjau, I adalah momen inersia penampang melintang, dan Q adalah momen pertama (atau disebut juga statika momen) terhadap sumbu berat, bagian luas di atas lapisan horizontal (jadi, $Q = \int y dA$). Penurunan ekspresi ini serta penggunaannya diuraikan pada Lampiran 5. Pada Lampiran 5 disebutkan pula bahwa ekspresi ini juga menunjukkan tegangan geser vertikal pada suatu titik karena tegangan geser vertikal pada satu titik sama dengan tegangan geser horizontal pada titik yang sama (lihat Gambar 6-12). Dengan demikian, tegangan geser vertikal juga bervariasi secara parabolik dengan nilai maksimum pada sumbu netral.

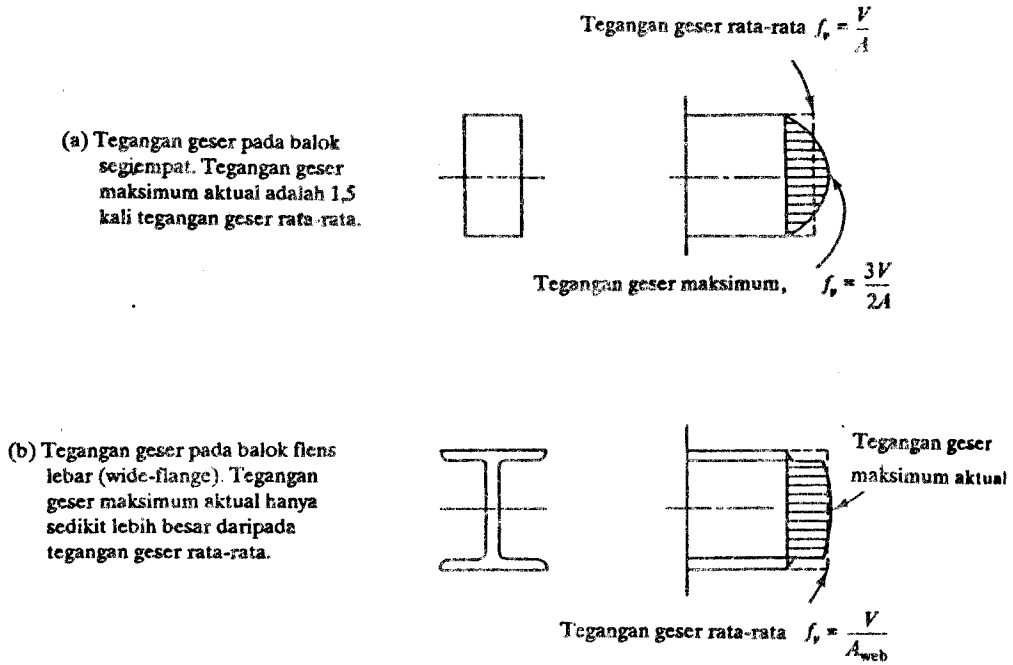


GAMBAR 6-11 Tegangan geser horizontal pada balok. Pada balok segi empat, tegangan geser horizontal bervariasi secara parabolik dari nilai maksimum di sumbu netral ke nol di tepi atas dan bawah. Distribusi tegangan di sepanjang bidang horizontal berbanding langsung dengan variasi gaya geser eksternal pada panjang tersebut. Apabila gaya geser besar, maka tegangan geser juga akan besar, begitu pula sebaliknya.



GAMBAR 6-12 Nilai numerik tegangan geser vertikal dan horizontal pada setiap titik pada balok selalu sama.

Persamaam umum tegangan geser $f_v = VQ/Ib$ dapat digunakan untuk berbag jenis penampang. Untuk penampang segiempat (lihat contoh berikut ini), tegangan geser terjadi pada sumbu netral balok (pada setengah tinggi) dan diberikan oleh $f_v = \frac{3}{2}(V/bh) = \frac{3}{2}(V/A)$ di mana b dan h adalah dimensi penampang melintang. Dengan demikian, tegangan geser maksimum pada penampang balok adalah 1,5 kali tegangan geser rata-rata penampang balok segiempat [lihat Gambar 6-13(a)].



(a) Tegangan geser pada balok segiempat. Tegangan geser maksimum aktual adalah 1,5 kali tegangan geser rata-rata.

(b) Tegangan geser pada balok flens lebar (wide-flange). Tegangan geser maksimum aktual hanya sedikit lebih besar daripada tegangan geser rata-rata.

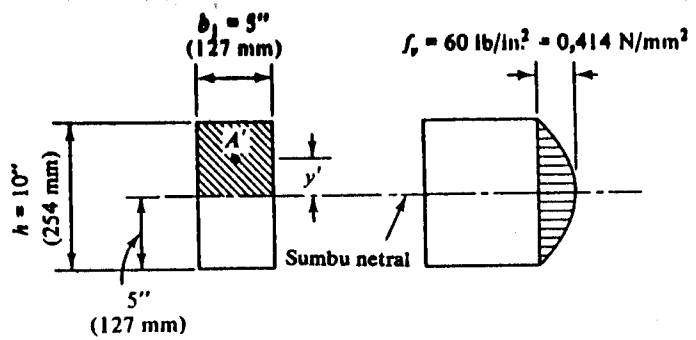
GAMBAR 6-13 Distribusi tegangan geser pada penampang balok segiempat, dan pada penampang balok bersayap lebar *(wide flange)*

CONTOH

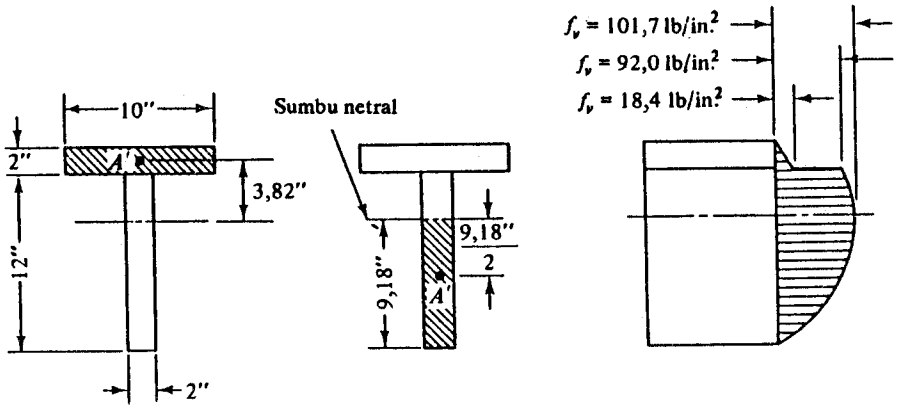
Pada balok kayu yang terlihat pada Gambar 6-14(a), kontrollah kekuatannya terhadap gaya geser. Anggap bahwa tegangan geser izin untuk material kayu yang digunakan adalah $F_v = 150$ lb/in.^{2} (1,03 N/mm^2).

Solusi:

Tegangan geser maksimum terjadi pada sumbu netral balok, pada penampang yang mempunyai gaya geser V maksimum. Jadi, tegangan geser maksimum adalah:



(a) Tegangan geser pada balok segiempat
Gaya geser: V = 2000 lb(8896 N).



(b) Tegangan geser pada balok T
Gaya geser:

GAMBAR 6-14 Tegangan geser pada balok.

$$f_v = \frac{VQ}{Ib} = \frac{V(A'y')}{Ib} = \frac{V(bh/2)(h/4)}{(bh^3/12)b} = \frac{3V}{2bh} = \frac{3}{2}\frac{2000\text{ lb}}{(5\text{ in.})(10\text{ in.})}$$
$$= 60\text{ lb/in.}^2$$

Nilai ini merupakan tegangan geser vertikal maupun horizontal maksimum yang terjadi pada balok tersebut. Karena 60 lb/in.^{2} $\leqslant$ 150 lb/in.^{2}, maka balok tersebut dapat dikatakan cukup kuat terhadap geser. Cara lain memperoleh tegangan geser maksimum adalah dengan menggunakan:

$$f_v = \frac{3}{2}\frac{V}{bh} = \frac{3}{2}\frac{(8896\text{ N})}{(127\text{ mm})(254\text{ mm})} = 0{,}414\text{ N/mm}^2 < 1{,}03\text{ N/mm}^2$$

CONTOH

Pada balok T yang telah dianalisis pada contoh sebelum ini, dan yang digambarkan ulang pada Gambar 6-14(b), tentukanlah tegangan geser yang timbul pada lokasi perbatasan antara flens dan *web* (badan) apabila diketahui V = 2000 lb. Apabila di antara kedua bagian ini digunakan lem yang menggabungkan kedua-duanya, tegangan apakah yang timbul pada lem tersebut? Apabila digunakan paku sejarak 3,0 in. as ke as untuk menggabungkan kedua bagian tersebut, berapakah gaya geser yang timbul di setiap paku? Berapakah tegangan geser maksimum yang timbul pada penampang melintang?

Solusi:

Ekspresi $f_v = VQ/Ib$ kita gunakan kembali di mana Q - A Y , yaitu statika momen bagian luas penampang di atas lapisan yang ditinjau (batas flens dan web). Jadi :

$$Q = A'y' = (b_1 \times h_1)(y') = (10 \text{ in.} \times 2 \text{ in.})(3{,}82 \text{ in.}) = 76{,}3 \text{ in.}^3$$

$I = 829{,}3$ in. (lihat contoh sebelum ini)

$b = 2$ in.

$V = 2000$ lb

$$f_v = \frac{VQ}{Ib} = (2000 \text{ lb})(76{,}3 \text{ in.}^3)/(829{,}3 \text{ in.}^4)(2 \text{ in.})$$

$$= 92{,}0 \text{ lb/in.}^2$$

Ini adalah tegangan vertikal dan horizontal) yang terjadi di perbatasan flens dan web. Apabila di antara flens dan web digunakan lem, maka lem itu akan mengalami tegangan sebesar ini. Apabila yang digunakan adalah paku, maka paku itu akan mengalami 2 in. x 92,0 lb/in.^{2} atau 184 lb/in. Seandainya paku diletakkan dengan jarak 3,0 in. as ke as, maka paku itu masing-masing memikul gaya geser 3 in. x 184 lb/in. = 552 lb. Nilai ini harus dibandingkan dengan gaya geser izin pada paku untuk menentukan apakah sistem paku tersebut kuat atau tidak.

Tegangan geser maksmim pada penampang terjadi pada sumbu netral. Lebih mudah apabila kita meninjau luas di bawah sumbu netral untuk mengevaluasi $Q = A'Y'$. Jadi :

$$Q = A'y' = (2 \text{ in.} \times 9{,}18 \text{ in.})(9{,}18 \text{ in.}/2) = 84{,}3 \text{ in.}$$

$$f_v = \frac{VQ}{Ib} = \frac{(2000 \text{ lb})(84{,}3 \text{ in.})}{(829{,}3 \text{ in.}^4)(2 \text{ in.})}$$

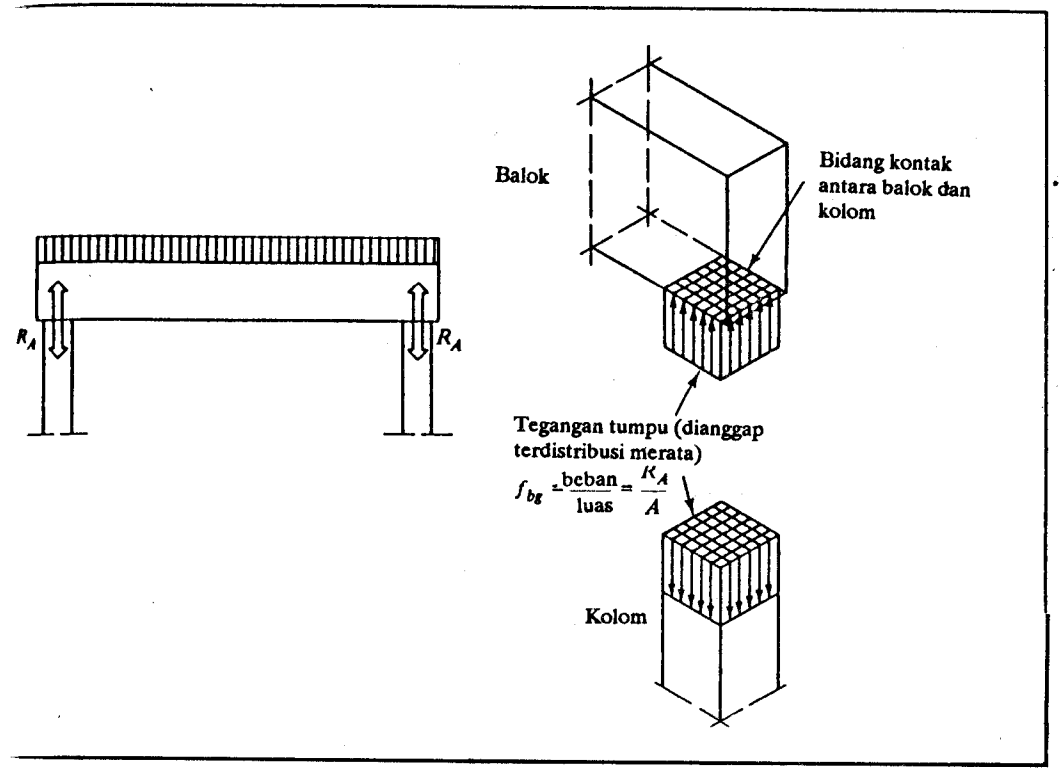
$$= 101{,}7 \text{ lb/in.}^2$$

Distribusi tegangan geser untuk seluruh penampang terlihat pada Gambar 6-14(b). Diskontinuitas pada perbatasan flens-web terjadi karena adanya perubahan lebar b secara tiba-tiba (dari 2 in. ke 10 in.).

6.3.3 Tegangan Tumpu

Tegangan yang timbul pada bidang kontak antara dua elemen struktur dinamakan *tegangan tumpu (bearing stress)*. Sebagai contoh, tegangan ini terjadi pada ujung-ujung balok sederhana yang terletak di atas tumpuan ujung dengan dimensi tertentu. Besar tegangan yang timbul ini bergantung pada besar gaya yang disalurkan melalui titik kontak dan luas permukaan kontak di antara kedua elemen. Semakin kecil luas bidang kontak, akan semakin besar tegangan tumpu yang timbul. Tegangan ini menyebabkan terjadinya deformasi pada kedua elemen pada titik kontak. Deformasi ini pada umumnya melibatkan bagian elemen hanya pada jarak yang kecil.

Besar tegangan tumpu yang timbul pada satu titik dengan mudah dapat dihitung dengan menggunakan rumus $f_{bg} = P/A$, yaitu sebesar beban yang disalurkan dibagi luas bidang kontak. Hal ini didasarkan atas anggapan bahwa tegangan kontak terdistribusi merata di seluruh bidang kontak. Asumsi ini tidak tepat benar, tetapi masih dapat diterima untuk digunakan.



GAMBAR 6–15 Tegangan tumpu di ujung balok.

Banyak material, misalnya kayu, yang sangat mudah mengalami kegagalan akibat tegangan tumpu. Apabila beban tekan disalurkan, kegagalan tegangan tekan biasanya terjadi, dan hal ini ditunjukkan dengan "hancur"-nya material. Kegagalan ini pada umumnya dapat dilokalisasi, tetapi lebih baik apabila dihindari.

CONTOH

Anggap bahwa balok kayu yang terlihat pada Gambar 6–15 memikul beban terdistribusi merata 500 lb/ft (7300 N/m) di seluruh bentang 16 ft (4.87 m). Anggap pula bahwa luas bidang kontak antara balok dan kolom yang menumpunya adalah 4 in. x 4 in. (101,6 mm x 101,6 mm). Apabila tegangan izin tumpu balok kayu adalah F_{bg} = 400 lb/in.^{2} (2,76 N/mm^2), kontrollah apakah luas bidang kontak itu cukup besar. Hitunglah tegangan tumpu aktual yang timbul akibat reaksi. Besar reaksi adalah 4.000 lb (17792 N) dan luas bidang kontak adalah 4 in. x 4 in. = 16 in.^{2} (10322,6 mm^2).

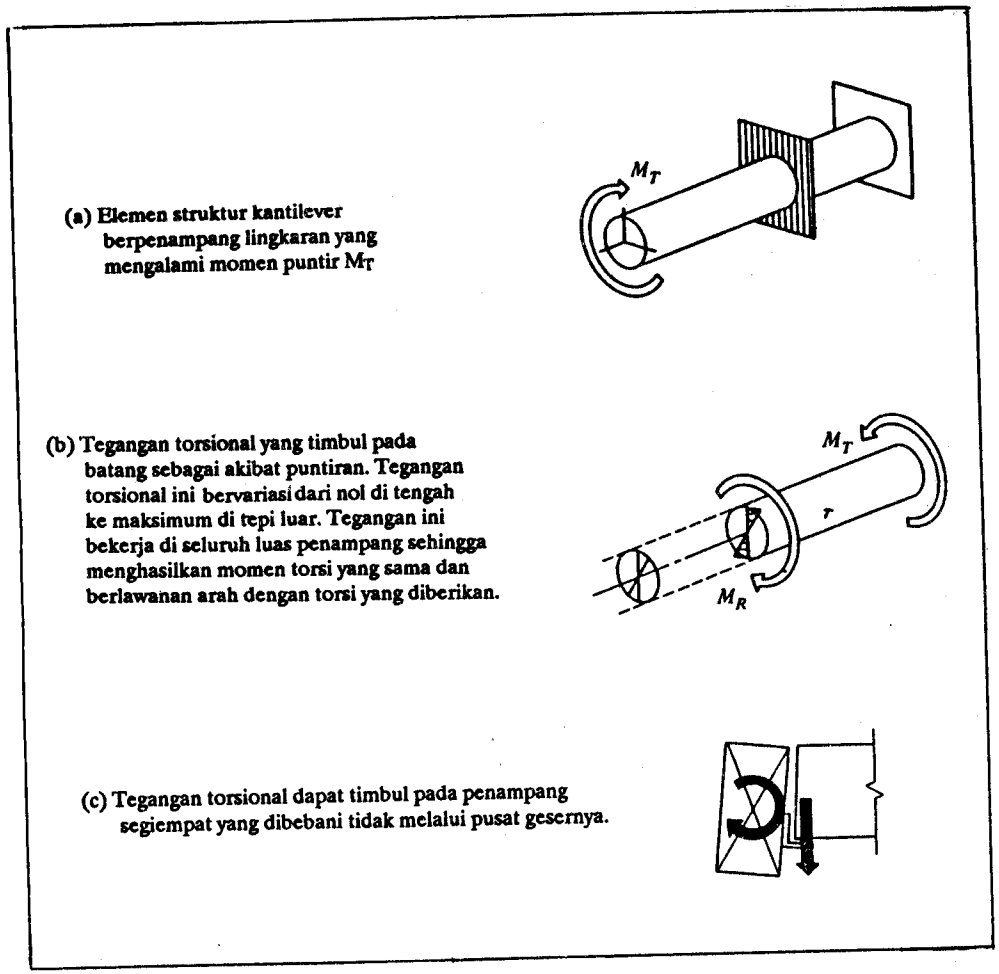
Solusi:

$$\text{Tegangan kontak aktual} = f_{b_g} = \frac{P}{A} = \frac{4000 \text{ lb}}{16 \text{ in.}^2}$$
$$= 250 \text{ lb/in.}^2$$
$$= \frac{(17792 \text{ N})}{(10.322{,}6 \text{ mm}^2)}$$
$$= 1{,}72 \text{ N/mm}^2$$

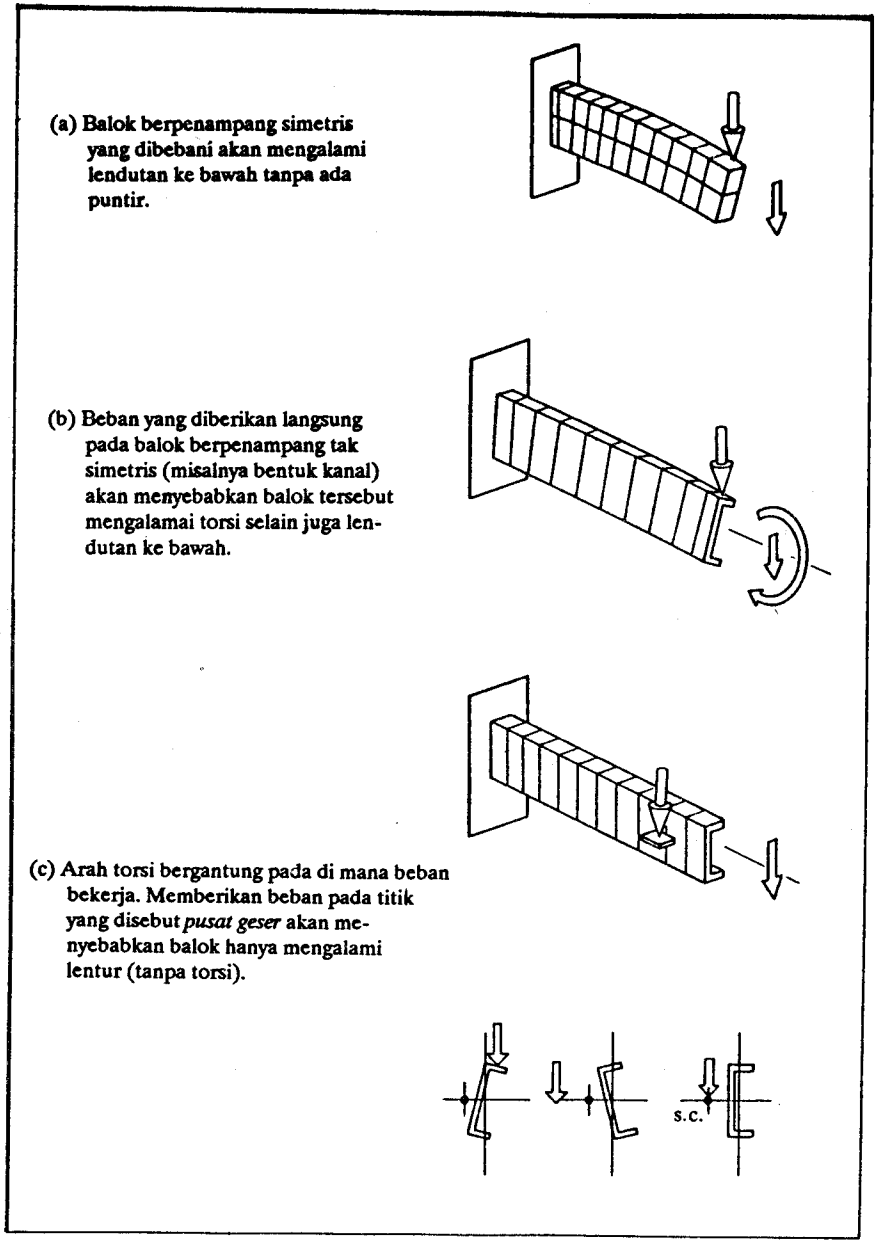
Karena tegangan tumpu aktual ini lebih kecil daripada tegangan tumpu izin (250 lb/in^2 < 400 lb/in.^{2} atau 1,72 N/mm^2 < 2,76 N/mm^2), maka luas bidang kontak antara kedua elemen sudah cukup.

6.3.4 Torsi

Torsi adalah puntiran. Dalam banyak hal, sering terjadi gaya yang menyebabkan elemen struktur berotasi terhadap sumbu longitudinalnya. Gambar 6–16(a) memperlihatkan elemen struktur lingkaran yang mengalami torsi. Analisis tegangan yang timbul akibat jenis gaya ini sebenarnya tidak terlalu rumit, tetapi tidak akan dibahas secara lebih rinci di sini. Gambar 6–16(b) mengilustrasikan jenis tegangan yang timbul pada elemen struktur yang mengalami momen torsi. Gaya yang merupakan resultan dari tegangan torsi merupakan kopel yang mengimbangi momen torsi eksternal. Tegangan pada suatu titik τ bergantung pada besar momen torsi M_T, lokasi titik (yang terdefinisi dengan jarak r dari pusat berat), dan besaran penampang yang disebut J. Hubungan antara parameter-parameter tersebut diberikan oleh $\tau = Mr/J$. Ekspresi ini analog dengan ekspresi tegangan lentur ($f_y = Mc/I$) di mana J analog dengan I dan didefinisikan sebagai $J = {}_A\int r^2 dA$. Besaran J disebut sebagai *momen inersia polar.*



GAMBAR 6–16 Torsi pada balok. Tegangan geser torisonal timbul pada elemen struktur tersebut sebagai akibat dari momen torsi padanya.



GAMBAR 6–17 Pusat geser (*shear centre*) pada balok. Pada penampang tak simetrik, pemberian beban dapat menyebabkan terjadinya puntiran. Dengan menerapkan beban melalui "pusat geser" balok, maka hanya akan terjadi lentur, tanpa ada puntir. Pusat geser penampang tak simetris sering kali terletak di luar penampang.

Untuk penampang yang bukan lingkaran, analisis tegangan akibat torsi merupakan hal yang sangat rumit. Gambar 6–16(c) mengilustrasikan balok segiempat yang mengalami tegangan torsi. Tegangan torsi yang timbul pada balok juga bergantung pada besar momen torsi yang diberikan oleh M_T, lokasi titik yang ditinjau, dan besaran penampang (dalam hal ini penampang segiempat). Hubungan ini mempunyai bentuk $\tau = \alpha M_T/b^2 d$. Kita dapat juga melakukan analisis tegangan torsi untuk penampang berbentuk lain, tetapi hal ini di luar lingkup buku ini.[2]

6.3.5 Pusat Geser

Salah satu hal penting dalam penggunaan elemen struktur yang penampangnya tidak simetris, yang pada umumnya merupakan penampang berdinding tipis (misalnya penampang C), adalah fenomena puntir akibat beban transversal. Pada penampang simetris, seperti misalnya penampang segiempat yang terlihat pada Gambar 6–17(a), hanya akan terjadi lendutan ke bawah. Apabila beban yang sama bekerja pada penampang tak simetris, akan terjadi puntir [lihat Gambar 6–17(b)] karena garis kerja beban tidak berimpit dengan *pusat geser* penampang elemen struktur tersebut. Puntir itu dapat diprediksi dengan meninjau lebih lanjut aksi tegangan yang ada pada elemen struktur tersebut. Puntir itu dapat diprediksi dengan meninjau lebih lanjut aksi tegangan yang ada pada elemen struktur, dan dapat diterangkan dengan menggunakan *aliran geser (shear flow)*, tetapi topik ini tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini. [3] Meskipun ada torsi ini, elemen balok tersebut dapat saja digunakan, tetapi desainnya menjadi lebih rumit dibandingkan dengan desain lentur saja. Apabila kita menginginkan balok tidak mengalami torsi, kita dapat dengan mudah merencanakan agar beban yang bekerja mempunyai garis kerja melalui pusat geser penampang balok. Dalam Gambar 6–17(c), beban yang bekerja menimbulkan torsi dengan arah seperti tergambar. Oleh karena itu, harus ada gaya pada titik pada penampang di mana beban dapat bekerja tanpa menimbulkan puntir. Titik inilah yang disebut *pusat geser.* Banyak referensi yang membahas hal ini. [4] Perhatian bahwa pada contoh yang digambarkan, pusat geser terletak di luar penampang, yang berarti menyulitkan kita memberikan beban yang melalui titik tersebut.

6.3.6 Tegangan Gabungan

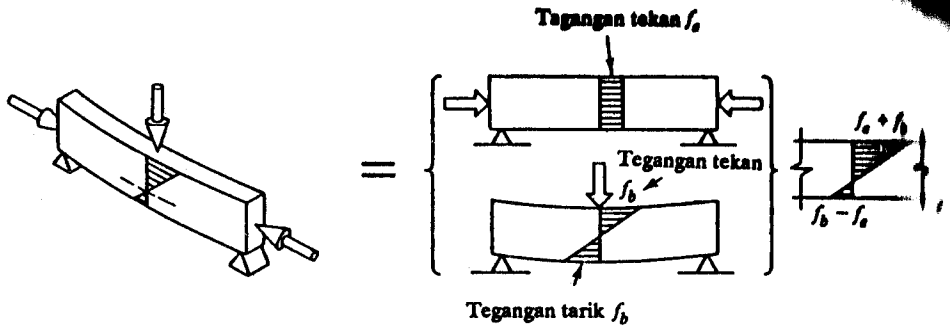
Sering kali terjadi elemen struktur mengalami tidak hanya momen lentur murni atau gaya aksial murni, tetapi juga kombinasi di kedua-duanya. Hal ini sering terjadi dalam konteks mendesain kolom atau dalam balok prategang. Pada Bab 6.3.6 ini kita akan meninjau secara ringkas bagaimana momen lentur dan gaya aksial berinteraksi. Analisis ini didasarkan atas prinsip dasar superposisi.

---

2. Untuk pembahasan lebih lanjut, lihatkan misalnya Stephen Crandall dan Norman Dhal, *An Introduction to the Mechanics of Solids,* MacGraw-Hill Book Company, New York, 1959.

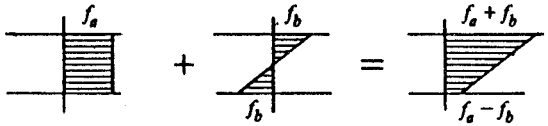
3. Lihat misalnya, Crandall dan Dahl.

4. Lihat misalnya Crandall dan Dahl.



(a) Balok yang memikul gaya aksial dan momen lentur

(b) Dengan menggunakan prinsip superposisi, tegangan akibat tiap gaya dalam dapat dihitung secara terpisah. Distribusi tegangan akhir adalah kombinasi dari kedua-duanya. Tegangan yang searah saling menambahkan, yang berlawanan saling mengurangi.



(c) Pada contoh ini, tegangan tekan yang diakibatkan gaya aksial sedemikian besarnya hingga dapat mengalahkan tegangan tarik akibat lentur. Dengan demikian seluruh penampang tersebut mengalami tekan.

GAMBAR 6–18 Tegangan gabungan pada balok. Distribusi tegangan akhir pada balok yang memikul gaya aksial dan momen lentur merupakan kombinasi dari tegangan-tegangan akibat masing-masing gaya dalam tersebut.

Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar 6–18(a), yang mengalami gaya aksial (melalui pusat beratnya) dan momen lentur. Distribusi tegangan akibat setiap gaya dalam ini mempunyai bentuk $f_a = P/A$ (akibat gaya aksial) dan $f_y = My/I$ (akibat momen lentur). Tegangan pada setiap titik pada penampang merupakan kombinasi dari kedua tegangan tersebut saling menambahkan atau mengurangkan, bergantung pada sifat tarik atau tekannya tegangan. Dengan demikian, distribusi tegangan pada Gambar 6–18(b) atau (c) mungkin terjadi, bergantung pada nilai positif-negatifnya tegangan akibat momen lentur dan gaya aksial.

Dengan memperbesar gaya aksial tekan, tegangan tarik akibat lentur dapat dihilangkan sama sekali, dan seluruh penampang melintang akan mengalami tegangan tekan. Seperti dibahas pada Bab 6.4.7, prinsip ini merupakan dasar dari desain beton prategang.

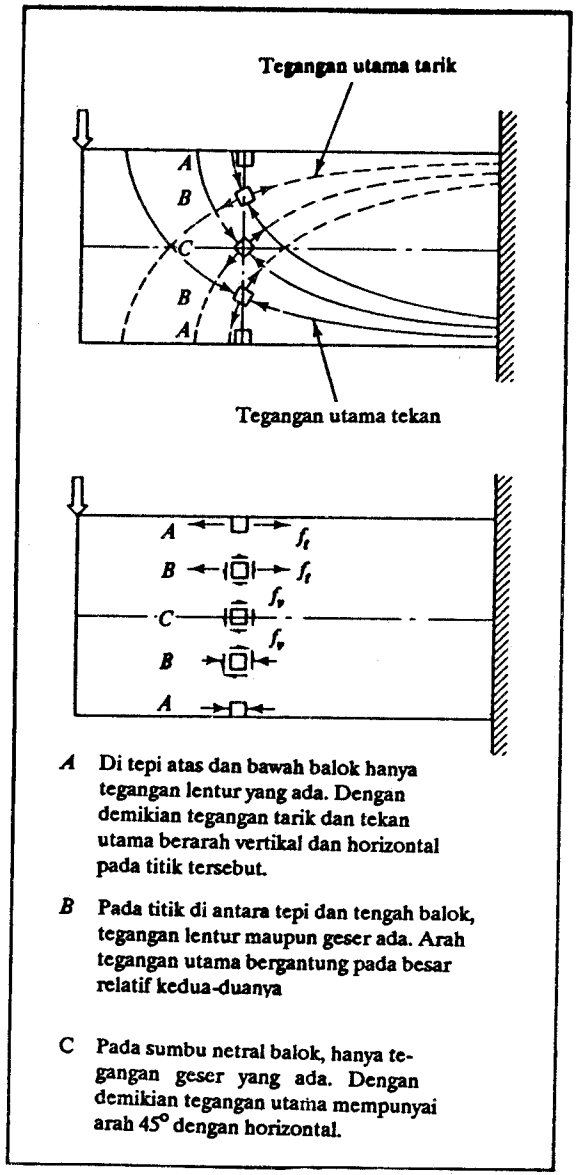
Pada jenis penampang tersebut, sumbu netral atau bidang yang mempunyai tegangan nol tidak lagi berimpit dengan sumbu berat penampang.

6.3.7 Tegangan Utama

Salah satu hal yang menarik dalam analisis balok adalah interaksi antara tegangan lentur dan tegangan geser. Pada Bab 6.3.6 telah dibahas tegangan gabungan antara yang diakibatkan oleh gaya aksial dan yang diakibatkan oleh momen lentur. Kedua-duanya dapat dijumlahkan secara aljabar karena mempunyai arah sama (yaitu arah longitudinal elemen struktur yang bersangkutan). Jenis-jenis tegangan yang mempunyai arah berbeda tidak dapat dijumlahkan secara aljabar begitu saja, tetapi dengan menggunakan analogi resultan gaya-gaya tak-searah (dengan menggunaan vektor). Pada balok, interaksi antara tegangan lentur dan tegangan geser dapat merupakan tegangan normal tekan atau tarik, yang disebut sebagai *tegangan utama (principle stresses)*. Arah tegangan aksial ini pada umumnya berbeda dengan arah tegangan lentur maupun tegangan gesernya.

Pada balok kantilever, tegangan yang timbul di beberapa elemen khas diperlihatkan pada Gambar 6–19. Untuk setiap elemen ada satu kumpulan (set) tegangan tarik dan atau tekan yang merupakan tegangan utama. Perhatikan bahwa untuk elemen yang terletak pada sumbu netral balok di mana tegangan lenturnya nol, hanya tegangan geser yang ada. Seperti terlihat pada Gambar 6–19, tegangan ini dapat digabungkan menjadi tegangan tarik dan tekan ekuivalen yang membentuk sudut 45° dengan sumbu netral. Pada elemen di permukaan terluar hanya terjadi tegangan lentur (tegangan gesernya nol). Dengan demikian, terjadi tegangan utama tarik sesuai dengan tegangan lentur, dan mempunyai arah seperti terlihat pada Gambar 6.19. Untuk elemen yang mengalami kedua-duanya (tegangan geser dan tegangan lentur), tegangan utamanya mempunyai kemiringan yang bergantung pada besar relatif antar kedua-duanya. Dengan meninjau bagian-bagian lain dari balok, kita dapat menggambarkan trajektori tegangan seperti terlihat pada gambar tersebut. Perlu dicatat bahwa garis tersebut bukan merupakan garis tegangan konstan, melainkan garis yang menunjukkan *arah* tegangan utama. Besar tegangan utama dapat bervariasi, bergantung pada distribusi dan besar relatif tegangan geser dan lentur pada balok tersebut.

Gambar 6–20 memperlihatkan trajektori tegangan yang ada pada balok di atas tumpuan sederhana. Perhitungan besar tegangan utama sebenarnya tidak sulit, tetapi sayangnya tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini. Pada umumnya dapat dibuktikan bahwa nilai maksimum dan minimum untuk tegangan utama tarik dan tekan terjadi pada bidang yang tegangan gesernya sama dengan nol, dan tegangan geser maksimum terjadi pada bidang yang membentuk sudut 45° dengan bidang tegangan tarik dan tekan utama.

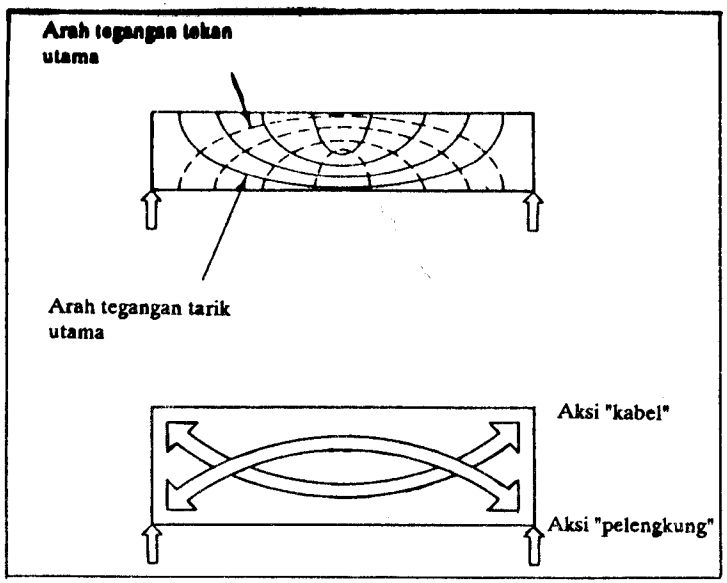


A Di tepi atas dan bawah balok hanya tegangan lentur yang ada. Dengan demikian tegangan tarik dan tekan utama berarah vertikal dan horizontal pada titik tersebut.

B Pada titik di antara tepi dan tengah balok, tegangan lentur maupun geser ada. Arah tegangan utama bergantung pada besar relatif kedua-duanya

C Pada sumbu netral balok, hanya tegangan geser yang ada. Dengan demikian tegangan utama mempunyai arah 45° dengan horizontal.

GAMBAR 6–19 Tegangan utama pada balok kantilever. Tegangan utama berasal dari interaksi antara tegangan geser dan tegangan lentur. Garis yang terlihat pada gambar disebut *trayektori tegangan* yang menunjukkan *arah* tegangan utama pada balok tersebut. Garis ini *bukan* merupakan tegangan konstan.



GAMBAR 6–20 Garis tegangan utama: implikasi pada mekanisme-pemikul-beban yang ada pada balok.

6.3.8 Defleksi

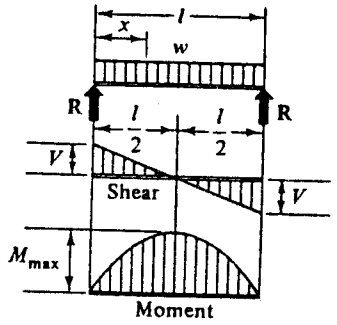
Pada penggunaan balok dalam konteks gedung ada tinjauan lain yang juga penting, yaitu lendutan (defleksi) balok dalam keadaan dibebani. Pada Bab 6.3.8 ini akan dibahas secara ringkas konsep dasarnya beserta karakteristik defleksi balok untuk berbagai **kondisi**.

Perhatikan balok pada Gambar 6–21(a). Pada gambar tersebut digambarkan (secara dibesarkan) lendutan balok akibat beban yang tergambar. Defleksi Δ di suatu titik pada balok bergantung pada beban w, panjang bentang balok L, dan berbanding terbalik dengan kekakuan balok. Telah kita ketahui bahwa kekakuan ini merupakan besaran yang bergatung pada jenis material yang digunakan (dalam hal ini adalah modulus elastisitas E) dan besaran penampang melintang (dalam hal ini adalah momen inersia I). Dengan demikian, lendutan Δ bergantung pada w, L, $1/I$, dan $1/E$. Ingat bahwa hubungan yang berlaku adalah:

apabila w bertambah, maka Δ bertambah
apabila L bertambah, maka Δ bertambah
apabila I bertambah, maka Δ berkurang
apabila E bertambah, maka Δ berkurang

Hubungan yang lebih jelas di antara parameter-parameter tersebut dibahas lebih rinci pada Lampiran 6, 7, dan 8, di mana dibahas ekspresi lendutan balok untuk berbagai jenis beban dan kondisi tumpuan.

(a)



$$R = V = \frac{wl}{2}$$

$$V_x = w\left(\frac{l}{2} - x\right)$$

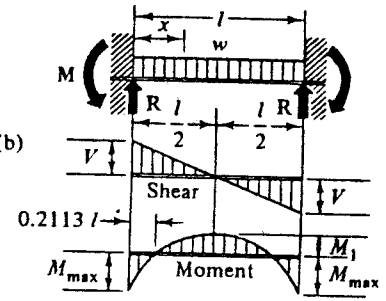
$$M_{max} = \frac{wl^2}{8}$$

$$M_x = \frac{wx}{2}(l - x)$$

$$\Delta_{max} = \frac{5wl^4}{384EI}$$

$$\Delta_x = \frac{wx}{24EI}(l^3 - 2x^2l^3 + x^3)$$

(b)



$$R = V = \frac{wl}{2}$$

$$V_x = w\left(\frac{l}{2} - x\right)$$

$$M_{max} = \frac{wl^2}{12}$$

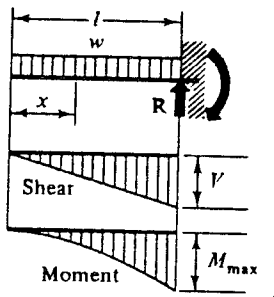
$$M_1 = \frac{wl^2}{24}$$

$$M_x = \frac{w}{12}(6lx - l^2 - 6x^2)$$

$$\Delta_{max} = \frac{wl^4}{384EI}$$

$$\Delta_x = \frac{wx^2}{24EI}(l - x)^2$$

(c)



$$R = V = wl$$

$$V_x = wx$$

$$M_{max} = \frac{wl^2}{2}$$

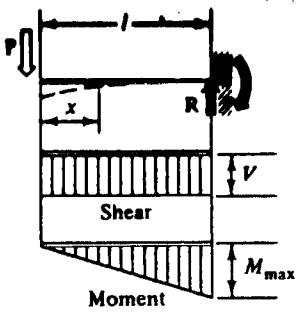
$$M_x = \frac{wx^2}{2}$$

$$\Delta_{max} = \frac{wl^4}{8EI}$$

$$\Delta_x = \frac{w}{24EI}(x^4 - 4l^3x + 3l^4)$$

GAMBAR 6–21 Defleksi pada balok.

(d)



$$R = V = P$$

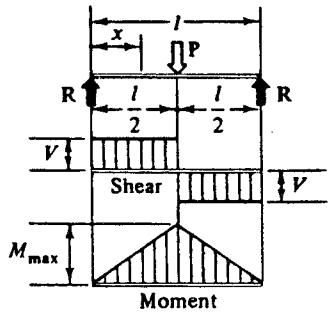
$$M_{max} = Pl$$

$$M_x = Px$$

$$\Delta_{max} = \frac{Pl^3}{3EI}$$

$$\Delta_x = \frac{P}{6EI}(2l^3 - 3l^2x + x^3)$$

(e)



$$R = V = \frac{P}{2}$$

$$M_{max} = \frac{Pl}{4}$$

$$M_x = \frac{Px}{2} \quad \left(\text{dimana } x < \frac{l}{2}\right)$$

$$\Delta_{max} = \frac{Pl^3}{48EI}$$

$$\Delta_x = \frac{Px}{48EI}(3l^2 - 4x^2) \quad \left(\text{dimana } x < \frac{l}{2}\right)$$

GAMBAR 6–21 (lanjutan)

Untuk balok di atas tumpuan sederhana yang dibebani terbagi rata, defleksi (lendutan) maksimum dapat dibuktikan mempunyai hubungan $\Delta = 5wl^4/384EI$. Jelas bahwa lendutan *sangat* peka terhadap perubahan tinggi balok. Menarik pula untuk mengingat bahwa untuk balok yang benar-benar sama dalam semua aspek dengan balok yang telah disebutkan di atas, kecuali kondisi tumpuannya adalah jepit, lendutan yang diperoleh adalah $\Delta = wL^4/384EI$. Dengan demikian menjadikan ujung balok terjepit (untuk beban terbagi rata) akan memperkecil lendutan maksimum hingga 1/5-nya. Perhatikan bahwa bentuk ekspresi kedua-duanya sama, hanya berbeda konstantanya. Bertambahnya kekakuan sehubungan dengan dijepitnya ujung balok, ataupun dengan membuatnya menerus di atas banyak tumpuan, merupakan hal yang sangat menguntungkan dalam mengurangi lendutan sehingga hal ini sangat sering dilakukan.

Pada Gambar 6–21 diperlihatkan ekspresi defleksi untuk berbagai jenis balok. Masalah defleksi akan ditinjau kembali pada Bab 6.4.1.

CONTOH

Suatu balok kayu bertumpuan sederhana dan mempunyai bentang 20ft (6,1 m) memikul beban terdistribusi merata 200 lb/ft (2920 N/m). Balok ini mempunyai penampang melintang segiempat berukuran b = 8 in. (203,2 mm) dan d = 16 in. (406,4 mm). Modulus elastisitas kayu yang dipakai adalah $E = 1{,}6 \times 10^6$ lb/in.^{2} (11,032 N/mm^2). Berapakah defleksi maksimum tengah batang?

Solusi:

Momen inersia:

$$I = \frac{bd^3}{12} = \frac{(8 \text{ in.})(16 \text{ in.})^3}{12} = 2730 \text{ in.}^4$$

$$= \frac{(203{,}2 \text{ mm})(406{,}4 \text{ mm})^3}{12} = 1136{,}6 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Defleksi:

$$\Delta = \frac{5wL^4}{384EI}$$

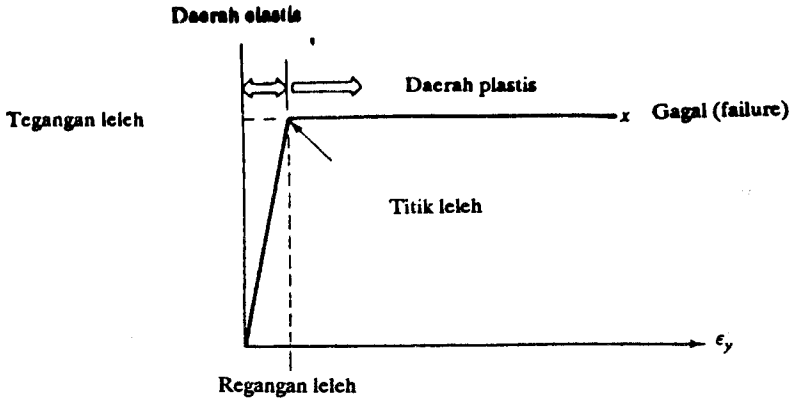
$$= \frac{5(200 \text{ lb/ft}/12 \text{ lb/in.})(20 \text{ ft} \times 12 \text{ in.})^4}{384(1{,}6 \times 10^6 \text{ lb/in.}^2)(2730 \text{ in.}^4)} = 0{,}165 \text{ in.}$$

$$= \frac{5(2.920 \text{ N/mm})(6100 \text{ mm})^4}{384(11{,}032 \text{ N/mm}^2)(1136{,}6 \times 10^6 \text{ mm}^4)} = 4{,}2 \text{ mm}$$

6.3.9 Perilaku Plastis pada Balok

Analisis yang kita lakukan sejauh ini didasarkan atas asumsi bahwa material balok bersifat *elastis linear* (yaitu tegangan sebanding dengan deformasi): Seperti telah dibahas pada Bab 2–5, ada jenis material, seperti baja, yang bersifat elastis linear hanya sampai titik tertentu pada saat material mulai berdeformasi secara permanen pada taraf tegangan relatif konstan. Apabila deformasi ini bertambah terus sampai berlebihan, maka material mengalami keadaan yang disebut *rupture*. Deformasi inilah yang disebut *deformasi plastis*. Kurva penyederhanaan yang menunjukkan perilaku tersebut ditunjukkan pada Gambar 6–22. Perilaku ini merupakan hal penting untuk mempelajari bagaimana suatu balok dapat mengalami kegagalan dalam memikul beban.

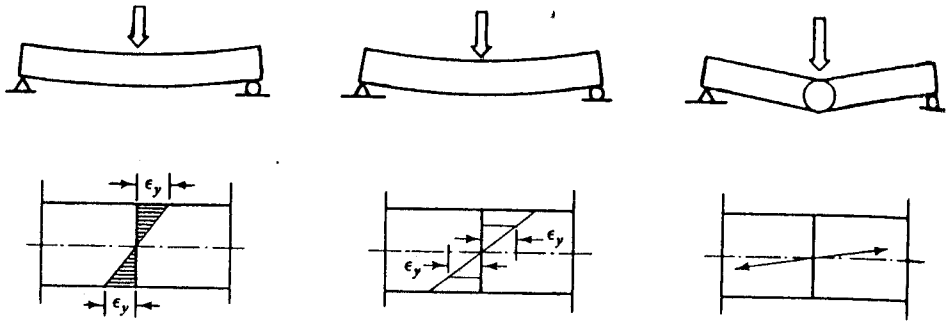
Perhatikan balok segiempat yang terlihat pada Gambar 6–23. Apabila beban eksternal pada balok masih relatif kecil, maka materialnya masih dalam keadaan elastis dan tegangan lenturnya terdistribusi secara linear pada penampang melintang. Apabila bebannya bertambah terus, maka tegangan lentur juga bertambah sampai materialnya mencapai titik f_y, yaitu mulai *leleh* dan masuk ke dalam daerah plastis. Seperti terlihat pada Gambar 6–23(d), hal ini terjadi untuk momen pada penampang balok sebesar $M_y = F_y\,(bh^2/6)$. Memperbesar terus bebannya akan menyebabkan bertambahnya deformasi pada serat-serat balok (variasi regangan secara linear masih tetap terjadi karena hal ini merupakan fungsi dari geometri deformasi lentur di seluruh balok). Sebaliknya, variasi tegangan tidak linear lagi karena adanya bagian penampang yang berada dalam keadaan plastis. Pada keadaan ini masih ada bagian penampang di dekat sumbu netral yang tegangannya masih di bawah tegangan leleh F_y seperti terlihat pada Gambar 6–23(e). Pada taraf tersebut balok masih mampu memikul beban (serat tepi telah leleh, tetapi belum terjadi *rupture*). Penambahan beban eksternal selanjutnya dapat memperbesar deformasi sampai akhirnya semua bagian penampang mengalami leleh (berada dalam keadaan plastis penuh). Keadaan akhir beban yang menyebabkan tercapainya keadaan leleh pada serat terdekat ke sumbu netral merupakan beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok tersebut.



GAMBAR 6–22 Kurva tegangan-tegangan ideal untuk material daktail. Pada taraf tegangan tertentu, F_y, material mulai mengalami deformasi yang bertambah terus tanpa adanya penambahan tegangan. Kegagalan pada material dapat terjadi pada deformasi yang relatif besar.

Dapat dibuktikan bahwa momen yang menyebabkan keadaan plastis penuh pada penampang segiempat adalah $M_p = F_y(bh^2/4)$. Tepat sampai pada taraf momen ini baloknya dipandang mempunyai kemampuan memperbesar kapasitas momen tahanan cukup untuk mengimbangi momen eksternal. Akan tetapi, apabila beban (dan berarti momen) eksternal diperbesar lagi, maka balok sama sekali *tidak* mempunyai tambahan kapasitas tahanan momen internal sehingga akan terjadi deformaasi tambahan, dan akhirnya balok tersebut runtuh (collapse). Bila pada semua serat pada suatu penampang sudah terjadi leleh (sudah plastis penuh), kita sebut sudah terbentuk *sendi plastis (plastic hinge)* pada penampang tersebut.

Untuk bentuk segiempat, perbandingan antara momen pada saat sendi plastis terbentuk dengan momen pada saat leleh awal adalah $M_p/M_y = F_y(bh^2/4)/|F_y(bh^2/6)] = 1{,}5$. Suku $bh^2/4$ sering disebut sebagai *modulus plastis* penampang, Z. Pada balok statis tertentu yang diilustrasikan pada Gambar 6–23(a), perbandingan 1,5 berarti bahwa beban P_f yang diperlukan untuk benar-benar meruntuhkan balok adalah 1,5 kali beban P_y yang diperlukan untuk membuat terjadinya leleh awal. Untuk bentuk penampang lain, nilai perbandingan ini juga lain, karena itu perbandingan tersebut sering disebut sebagai *faktor bentuk* suatu balok, yang merupakan perbandingan antara modulus plastis penampang (Z) dan modulus elastis penampang (S). Jadi, faktor bentuk adalah Z/S. Untuk balok sayap lebar, faktor bentuk ini sangat bervariasi, tetapi nilainya sekitar 1,4. Faktor-faktor lainnya adalah 1,7 untuk penampang lingkaran dan 2,0 untuk penampang *diamond*.



(a) Distribusi regangan pada saat serat terluar baru mulai leleh

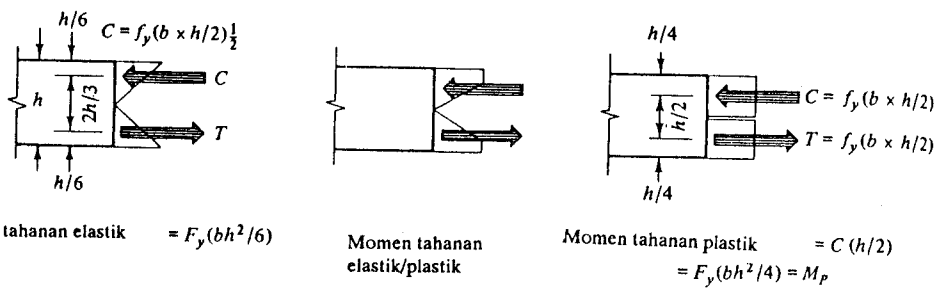
(b) Distribusi regangan pada saat serat agak ke dalam telah leleh

(c) Distribusi regangan pada saat semua serat pada penampang telah leleh

(d) Distribusi tegangan pada saat serat terluar baru mulai leleh

(e) Distribusi tegangan apabila sebagian serat telah leleh. Balok masih dianggap mempunyai kekuatan cadangan pada penampang itu.

(f) Distribusi tegangan pada saat semua serat pada penampang telah leleh. Balok tidak dapat lagi memikul momen tambahan pada penampang itu.

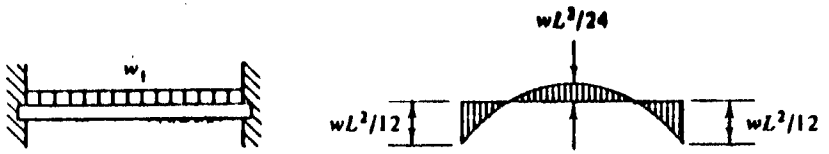


nen tahanan elastik $= F_y(bh^2/6)$

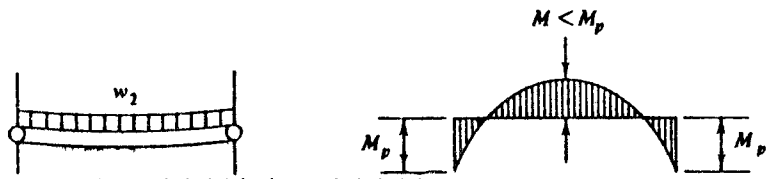
Momen tahanan elastik/plastik

Momen tahanan plastik $= C\,(h/2)$
$= F_y(bh^2/4) = M_p$

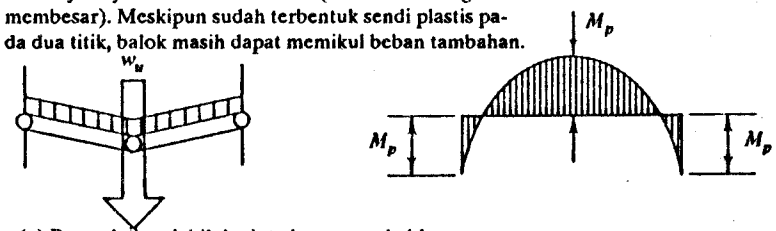
GAMBAR 6–23 Perilaku plastis pada balok. Apabila material balok mulai leleh pada saat dibebani, distribusi tegangan yang ada mulai berubah. Balok masih dapat menerima tambahan momen sampai semua bagian penampang telah leleh.



(a) Balok yang dijepit pada kedua ujungnya



(b) Apabila beban pada balok itu bertambah, balok akan mulai leleh pada penampang yang momen lenturnya besar (dalam hal ini pada ujung-ujung balok). Sendi plastis mulai terbentuk titik-titik tersebut. Balok mulai berperilaku seperti balok di atas tumpuan sederhana, dengan tambahan momen ujung yang berupa momen tahanan. Penambahan beban akan menyebabkan terjadinya redistribusi momen (momen di tengah membesar). Meskipun sudah terbentuk sendi plastis pada dua titik, balok masih dapat memikul beban tambahan.



(c) Penambahan lebih lanjut akan menyebabkan terbentuknya sendi plastis ketiga di tengah bentang. Balok akan runtuh pada saat sendi ini terbentuk.

GAMBAR 6–24 Pembentukan sendi plastis pada balok terjepit. Sendi plastis mula-mula terbentuk di lokasi momen maksimum. Pada saat tersebut balok belum runtuh. Apabila beban terus meningkat, maka suatu saat akan terbentuk sendi plastis lagi, yang dapat menyebabkan terjadinya mekanisme keruntuhan pada balok. Balok statis tak tentu seperti ini mempunyai cadangan kekuatan relatif besar.

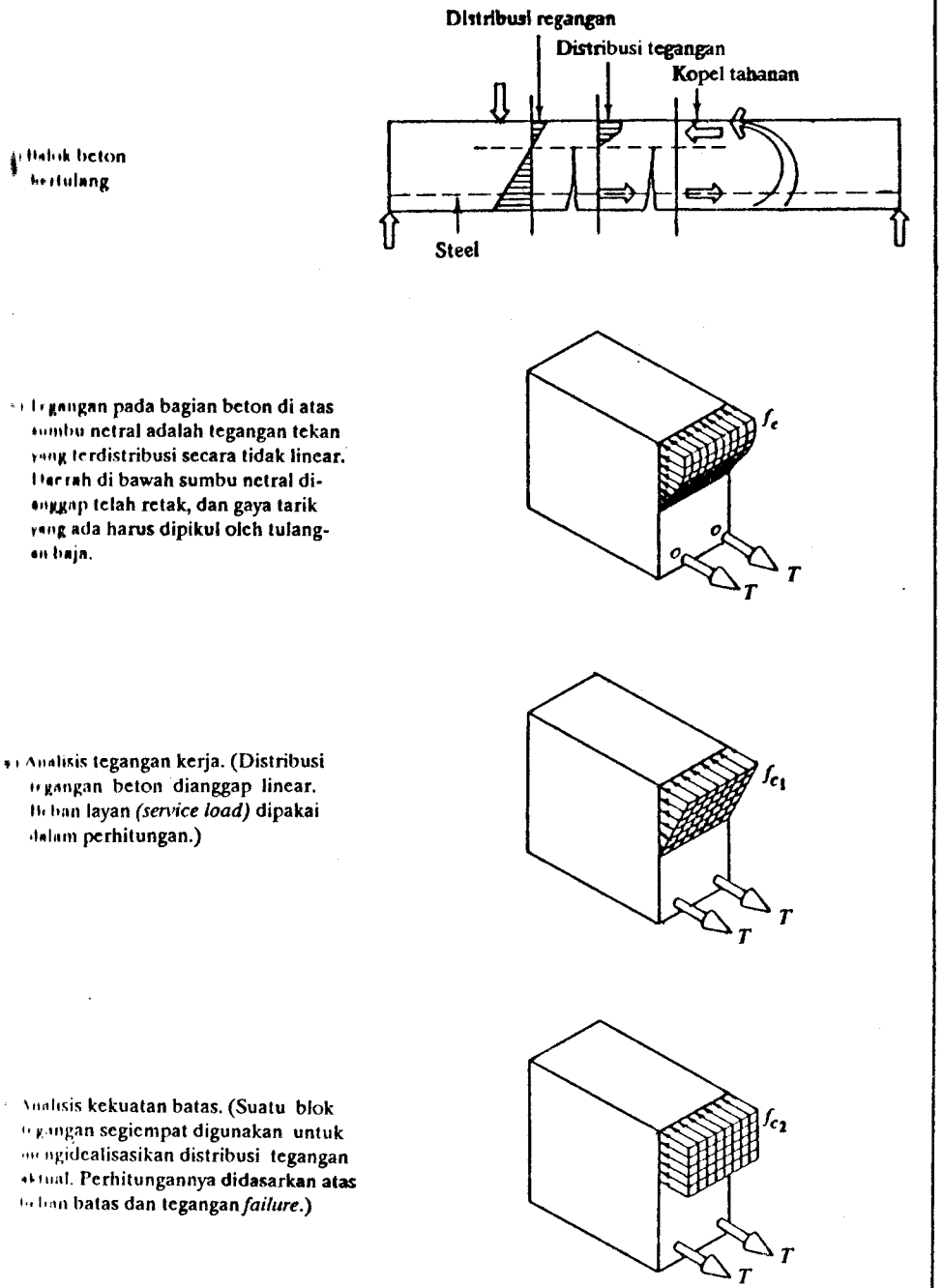
Pada struktur statis tak tentu, pembentukan satu sendi plastis belum langsung menyebabkan terjadinya keruntuhan struktur. Sejumlah tertentu sendi plastis harus terbentuk dulu sebelum runtuh. Perhatikan balok yang dijepit pada kedua ujungnya seperti terlihat pada Gambar 6–24 dan momen-momen yang ada pada struktur tersebut. Apabila beban w bertambah, maka suatu saat akan terjadi leleh pada ujung

balok dulu di mana momennya maksimum. Jika bebannya bertambah terus, sendi plastis akan terbentuk pada ujung-ujung tersebut. Momen di tengah bentang juga akan meningkat. Perhatikan bahwa terbentuknya sendi plastis pada ujung-ujung itu belum langsung menyebabkan terjadinya keruntuhan pada struktur karena strukturnya masih mempunyai kapasitas pikul momen di lapangan (tengah bentang). Peningkatan beban lebih lanjut tentu saja akan menyebabkan terbentuknya sendi plastis juga di lapangan. Pada saat tersebut terjadilah apa yang disebut *mekanisme* dan balok tidak mampu lagi memikul tambahan beban. Terjadi keruntuhan pada balok. Beban yang meruntuhkan (disebut *beban runtuh*), w_u, ini lebih besar daripada beban yang dihitung hanya dengan meninjau faktor bentuk. Banyak literatur telah membuktikan bahwa untuk balok segiempat yang dijepit, beban runtuh w_u adalah dua kali beban yang menyebabkan leleh (w_y).

6.3.10 Balok Beton Bertulang

Sejauh ini kita telah membahas perilaku balok yang dibebani, yang terbuat dari material elastis linear di mana tegangannya sebanding dengan deformasinya. Pada banyak material, misalnya beton bertulang, asumsi elastis linear ini tidak tepat. Beton sendiri hanya mempunyai kemampuan mengalami deformasi tarik (jadi juga tegangan tarik) yang sangat kecil. Seperti telah dibahas pada Bab 2, terhadap tekan beton juga tidak benar-benar bersifat elastis linear. Hubungan $f_y = M_y/I$ diturunkan berdasarkan *asumsi* bahwa material bersifat elastis linear dan mampu memikul tegangan tarik. Oleh karena itu, untuk beton bertulang perlu ada modifikasi dalam perhitungan tegangan lentur.

Teori yang telah dipakai pada analisis balok beton bertulang, seperti juga pada penurunan rumus $f_y = My/I$, didasarkan atas prinsip dasar bahwa gaya internal yang timbul di dalam balok harus dapat menjamin keseimbangan dengan gaya eksternal. Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar 6–25. Karena dibebani, maka terjadi lentur pada balok, dan terjadi pula pola deformasi seperti tergambar yang menunjukkan bahwa daerah di bawah sumbu netral mengalami tarik. Karena beton tidak dapat memikul tarik, maka tulangan baja diletakkan di daerah bawah sehingga berfungsi memikul gaya tarik yang ada. Perhatikan bahwa beton dianggap telah retak di seluruh daerah yang tertarik. Secara aktual retak tersebut memang terjadi, dan pada umumnya menjalar ke atas sampai ke tepi daerah tekan. Momen tahanan internal diperoleh dengan kopel antara gaya tarik pada tulangan baja (di daerah tarik) dan gaya tekan yang merupakan resultan dari tegangan tekan (di daerah beton yang tertekan). Dengan demikian, pada beton polos hanya sebagian dari penampang yang secara aktual berpartisipasi dalam memikul beban. Apabila besar momen eksternal yang ada telah diketahui, kita dapat menentukan gaya internal yang harus ada dan tegangan-tegangan pada beton serta tulangan baja. Sayangnya topik ini tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini, khususnya karena perilaku eksak beton bertulang sangat rumit (karakteristik deformasi beton pada umumnya tidak linear). Perhitungan yang sering dilakukan adalah dengan menggunakan model idealisasi yang didasarkan atas asumsi dengan menggunakan model idealisasi yang didasarkan atas asumsi bahwa beton yang tertekan berperilaku secara elastis



a) Balok beton bertulang

b) Tegangan pada bagian beton di atas sumbu netral adalah tegangan tekan yang terdistribusi secara tidak linear. Daerah di bawah sumbu netral dianggap telah retak, dan gaya tarik yang ada harus dipikul oleh tulangan baja.

c) Analisis tegangan kerja. (Distribusi tegangan beton dianggap linear. Beban layan *(service load)* dipakai dalam perhitungan.)

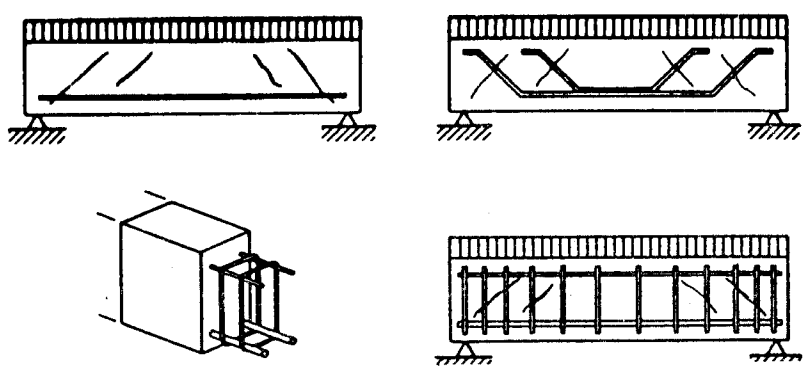
d) Analisis kekuatan batas. (Suatu blok tegangan segiempat digunakan untuk mengidealisasikan distribusi tegangan aktual. Perhitungannya didasarkan atas beban batas dan tegangan *failure*.)

Gambar 6–25 Balok beton bertulang.

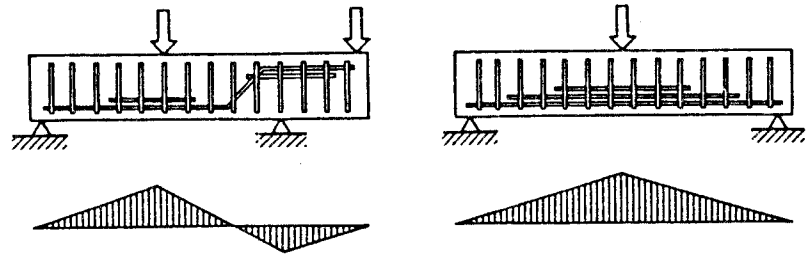
(analisis tegangan kerja = *working stress analysis*). Pendekatan ini sebenarnya tid realistis karena tegangan aktual pada beban kerja lebih mirip dengan yang terlih pada Gambar 6–25(b). Model lainnya adalah yang didasarkan atas perilaku bet bertulang yang telah diperoleh secara eksperimental, yaitu pada saat *beban runt* (bukan beban kerja). Model ini diperlihatkan pada Gambar 6–25(d), dan sering d sebut *analisis kekuatan batas (ultimate strength analysis).*

Seperti telah diduga, banyaknya tulangan tarik baja yang diperlukan bergantu langsung pada besar momen yang ada pada penampang yang ditinjau. Lokasi sumb netral sangat bergantung pada rasio banyaknya tulangan tarik terhadap ukuran p nampang melintang. Kekuatan penampang balok beton bertulang ditentukan ol kegagalan pada beton atau pada tulangan baja. Apabila tulangan baja yang digunaka banyak, kegagalan balok akan ditentukan oleh hancurnya beton tekan yang bersi *brittle*. Kegagalan demikian sangat berbahaya karena keruntuhan total akan dapa terjadi tiba-tiba tanpa adanya peringatan lebih dulu. Apabila banyaknya tulanga baja berkurang, ada pola kegagalan di mana beton dan baja gagal bersama-sama. Inila yang disebut dengan *balok balanced*. Apabila tulangan baja lebih sedikit lagi, mak kegagalan yang terjadi adalah terjadinya leleh pada tulangan baja dulu yang pad akhirnya diikuti dengan hancurnya beton. Keruntuhan baru terjadi apabila beto nya hancur. Lelehnya baja selalu diikuti dengan deformasi (jadi defleksi) besa sebelum terjadinya keruntuhan. Dengan demikian, ada peringatan lebih dulu yan berupa defleksi besar. Karena alasan itulah banyaknya tulangan pada balok dibata pada kondisi *undereinforced (tulangan kurang)*, dan tidak menggunakan *over reinforced (tulangan lebih)* agar tidak terjadi keruntuhan tiba-tiba.

Dalam memberikan tahanan geser balok beton bertulang, beton polos mem punyai kemampuan memikul tegangan geser sebelum retak. Kesulitannya bukan pad tegangan geser itu sendiri, melainkan pada tegangan utama tarik yang merupak interaksi dari tegangan geser dan tegangan lentur. Garis tegangan tarik utama untu balok yang dibebani terbagi rata telah dibahas dan diilustrasikan pada Gambar 6 Karena tegangan utama ini, retak dapat terjadi dengan arah seperti terlihat pad Gambar 6–26(a). Retak-retak ini disebut *retak tarik diagonal* dan mempuny potensi berbahaya karena dapat menyebabkan terjadinya kegagalan secara cep pada balok. Untuk mencegahnya, tulangan baja digunakan. Salah satu cara peng gunaan tulangan baja adalah dengan memakai pola yang didasarkan atas trajekto tegangan. Akan tetapi, untuk kemudahan pelaksanaan, biasanya tulangan baja d pasang vertikal meskipun cara ini kurang efisien dalam mencegah retak diagona Banyaknya tulangan yang diperlukan dan bagaimana distribusinya sangat bergantung pada besar gaya geser yang ada.



(a) Retak tarik diagonal pada balok beton. Hal ini diakibatkan oleh tegangan tarik utama yang berarah 45° terhadap horizontal. Oleh karena itu, perlu ada tulangan baja untuk mencegah retak. Baja diagonal (yang didapat dengan membengkokan tulangan memanjang) merupakan salah satu cara. Cara lain adalah dengan menggunakan sengkang vertikal. Perlu diperhatikan bahwa sengkang itu harus mampu mencegah retak tarik diagonal. Luas serta jarak antaranya ditentukan oleh gaya geser yang ada pada penampang.



(b) Meletakan tulangan pada balok beton bertulang. Banyaknya tulangan memanjang yang diperlukan pada penampang bergantung pada besar momen lentur yang ada pada penampang tersebut. Banyaknya tulangan vertikal bergantung pada gaya geser yang ada pada penampang.

GAMBAR 6–26 Balok beton bertulang.

DESAIN BALOK

6.4.1 Penentuan Dimensi Balok

Kontrol Kekuatan. Secara konsep, desain balok merupakan proses yang langsung. Apabila kondisi pembebanan diketahui, maka distribusi gaya internal (yaitu gaya geser dan momen lentur) yang timbul pada elemen struktur juga dapat diketahui. Dengan demikian, masalahnya adalah mencari besaran penampang balok yang cukup untuk memikul tegangan-tegangan yang timbul. Kombinasi sifat material maupun ukuran balok dapat saja digunakan. Tegangan yang harus dikontol bukan saja tegangan lentur, melainkan juga tegangan lainnya (misalnya geser, tumpu).

Proses desain balok memerlukan pengetahuan mengenai hubungan antara sifat penampang, tegangan, dan deformasi yang telah kita bahas pada awal Bab 6. Contoh-contoh berikut ini mengilustrasikan proses umum yang dipakai dalam menentukan karakteristik balok pada suatu penampang di mana momen lentur dan gesernya telah diketahui. Mula-mula kita tentukan dulu material yang akan digunakan sehingga kita ketahui *tegangan izin* terhadap lentur dan geser. Ukuran dan bentuk penampang ditentukan berikutnya dengan mengusahakan agar tegangan lentur aktual lebih kecil daripada atau sama dengan tegangan lentur izin material. Proses ini didasarkan atas penggunaan hubungan lentur $f_y = My/I$. Apabila distribusi tegangan pada balok telah kita ketahui, kita akan dapat mengetahui tegangan maksimum yang terjadi, yaitu untuk y maksimum (atau $y_{maks} = c$). Jadi, agar tegangan lentur aktual sama dengan tegangan izin, dapat kita tuliskan $F_b = Mc/I$ di mana F_b adalah tegangan izin lentur. Jadi, untuk berbagai bentuk penampang balok:

$$\left(\frac{I}{c}\right)_{\text{perlu}} = \frac{M}{F_b}$$

Perbandingan I/c disebut modulus penampang S. Dengan demikian, masalah desain selanjutnya adalah mencari nilai S (atau I/c) untuk balok yang sama atau lebih besar daripada nilai M/F_b.

Untuk balok segiempat (b = lebar, d = tinggi):

$$S = \frac{I}{c} = \frac{bd^3/12}{d/2} = \frac{bd^2}{6}$$

Jadi:

$$\left(\frac{bd^2}{6}\right)_{\text{perlu}} = \frac{M}{F_b} \quad \text{atau} \quad bd^2 = \frac{6M}{F_b}$$

Setiap balok segiempat yang memberikan nilai $bd^2 = 6M/F_b$ dapat digunakan (untuk tinjauan lentur saja).

Balok yang telah didesain cukup terhadap momen lentur belum berarti cukup terhadap tinjauan lainnya, misalnya terhadap tegangan geser atau terhadap lendutan. Proses yang biasa dilakukan adalah menentukan balok berdasarkan satu tinjauan dulu, misalnya lentur, kemudian mengeceknya terhadap kriteria lainnya. Apabila balok tidak cukup, maka perlu dilakukan desain ulang.

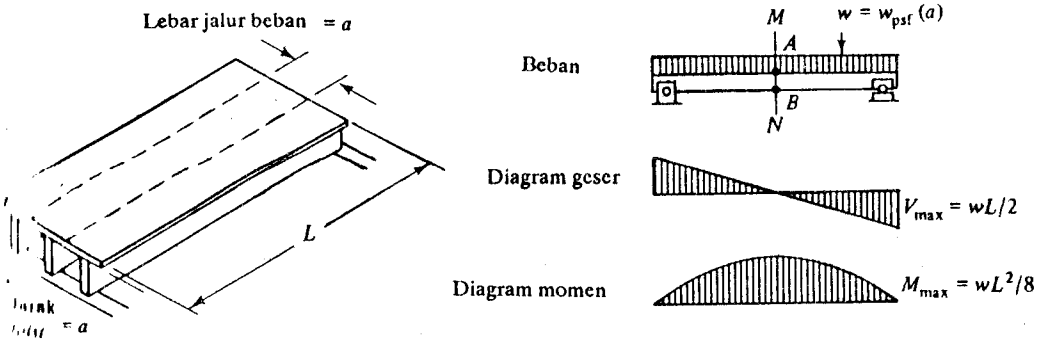
Kontrol Defleksi. Pengontrolan defleksi selalu merupakan masalah pada desain balok. Penentuan lendutan izin balok juga merupakan masalah sulit. Biasanya digunakan kriteria objektif. Apabila suatu balok melendut sedemikian rupa sehingga mengganggu fungsi elemen gedung lainnya, misalnya, defleksi izin mungkin saja didasarkan atas toleransi yang diperkenankan terjadi pada elemen lain itu. Akan tetapi penentuan defleksi ini sering kali lebih bersifat subjektif. Sebagai contoh, banyak orang yang lebih merasa tidak nyaman apabila berjalan di atas lantai yang melendut secara berlebihan.

Yang menentukan besarnya defleksi izin merupakan masalah rumit. Untuk itu sering kali digunakan petunjuk empiris. Kriteria empiris yang digunakan untuk lantai adalah lendutan tidak boleh melebihi $\frac{1}{360}$ kali bentangnya (kriteria ini sering ditulis $\Delta_{izin} = L/360$ di mana L adalah bentang lantai). Pembatasan defleksi (lendutan) untuk atap juga hampir sama, biasanya dapat sedikit lebih besar. Batasan umum lendutan atap adalah $L/240$. Apabila elemen struktur melendut lebih besar daripada yang dibatasi, maka elemen tersebut dipandang tidak dapat diterima atau digunakan. Jika demikian halnya, kita harus memperbesar kekakuan (memperbesar I, momen inersia) meskipun tegangannya menjadi jauh lebih kecil daripada tegangan izin. Kita dapat saja menggunakan kriteria defleksi ini untuk mencari I secara langsung, yaitu dengan menyamakan lendutan yang terjadi dengan lendutan izin. Jadi, untuk balok ditumpu sederhana yang dibebani merata (lendutan maksimumnya $\Delta = 5wL^4/384\,EI$), lendutan izin = Δ_{izin} disamakan dengan lendutan maksimumnya $\Delta = 5wL^4/384\,EI$ atau $I_{\text{perlu}} = 5(360)wL^4/384\,EL$.

Kriteria untuk lantai dan atap yang disebutkan pada paragraf sebelum ini dianggap konsevatif oleh banyak perencana dipandang dari sudut asal-usul kriteria tersebut. Kriteria $L/360$ berasal dari batas yang dianggap cukup untuk mencegah langit-langit di bawah lantai mengalami retak. Kriteria ini telah banyak digunakan oleh perencana. Menarik untuk diingat bahwa penentuan batas lendutan biasanya berdasarkan faktor kenyamanan, yang tentunya bergantung pada kondisi kultur pada lokasi bangunan tersebut.

CONTOH

Tentukanlah ukuran yang diperlukan untuk balok segiempat yang terlihat pada Gambar 6–27. Anggap bahwa beban hidup = 50 lb/ft^2, beban mati = 15 lb/ft^2 (termasuk berat lantai, penutup lantai dan estimasi berat balok), tegangan izin lentur = F_b = 1200 lb/in.^{2}, tegangan izin geser = F_v = 150 lb/in.^{2}, tegangan izin tumpu = F_{bg} = 400 lb/in.^{2}, dan defleksi izin $\Delta = L/360$. Anggap juga bahwa E = 1,6 × 10^6 lb/in.^{2}, L = 16,0 ft, serta $a = 16$ *in.*



GAMBAR 6–27 Sistem lantai *joist*

Solusi:

Beban:

beban/ft = w = beban terdistribusi × lebar lantai yang dipikul balok

= (50 lb/ft² + 15 lb/ft²) (16 in./12 in./ft)

= 86,5 lb/ft

Tegangan lentur:

$$\left(\frac{I}{c}\right)_{\text{perlu}} = S_{\text{perlu}} = \frac{M}{F_b}$$

$$\frac{bd^2}{6} = \frac{M}{F_b}$$

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{(86{,}5 \text{ lb/ft})(16 \text{ ft})^2}{8} = 2768 \text{ ft-lb} = 33.216 \text{ in.-lb}$$

$$\frac{bd^2}{6} = \frac{M}{F_b} = \frac{33.216 \text{ in.-lb}}{1200 \text{ lb/in.}^2}$$

$$bd^2 = 166{,}1 \text{ in.}^3$$

Kita dapat menentukan sembarang balok yang mempunyai nilai bd^2 = 166,1 in.³ agar cukup terhadap lentur. Kita coba b = 1,5 in. Jadi:

$$(1{,}5 \text{ in.})d^2 = 166{,}1 \text{ in.}^3 \quad \text{atau} \quad d = 10{,}5 \text{ in.}$$

Balok berukuran 1,5 in. × 10,5 in. merupakan ukuran yang cukup terhadap lentur. Ukuran kayu terdekat dalam perdagangan dengan ukuran tersebut adalah 2 × 12 (dimensi aktual 1,5 in. × 11,5 in.). Balok ini sedikit kelebihan ukurannya, tetapi masih cukup dekat. Langkah berikutnya adalah mengecek apakah balok ini cukup untuk faktor-faktor lainnya.

Tegangan geser:

Gaya geser maksimum terjadi pada kedua ujung balok:

$$V = \frac{wL}{2} = \frac{(86{,}5 \text{ lb/ft})(16 \text{ ft})}{2} = 692 \text{ lb}$$

$$f_v = \frac{3}{2}\frac{V}{bd} = \frac{3}{2}\left(\frac{692 \text{ lb}}{1{,}5 \text{ in.} \times 11{,}5 \text{ in.}}\right) = 65{,}9 \text{ lb/in.}^2$$

Ini adalah tegangan geser maksimum pada balok. Tegangan ini terjadi pada sumbu netral penampang, pada penampang ujung. Karena tegangan geser aktual ini lebih kecil daripada tegangan geser izin (65,9 < 150), maka balok tersebut dipandang cukup terhadap tegangan geser.

Tegangan tumpu:

Gaya pada ujung-ujung balok adalah 692 lb. Anggap bahwa luas bidang kontak adalah 1,5 in. × 2 in. Jadi:

$$f_{b_p} = \frac{P}{A} = \frac{692 \text{ lb}}{1{,}5 \text{ in.} \times 2 \text{ in.}} = 231 \text{ lb/in.}^2$$

Tegangan tumpu aktual lebih kecil daripada tegangan tumpu izin (231 < 400) sehingga balok tidak mengalami kelebihan tegangan tumpu.

Defleksi:

$$\Delta = \frac{5wL^4}{384EI}$$

$$= \frac{5[(86{,}5 \text{ lb/ft})/(12 \text{ in./ft})](16 \text{ ft} \times 12 \text{ in./ft})^4}{384(1{,}6 \times 10^6 \text{ lb/in.}^2)[1{,}5 \text{ in.} \times (11{,}5 \text{ in.})^3/12]}$$

$$= 0{,}42 \text{ in.}$$

Defleksi aktual di tengah bentang adalah 0,42 in. Defleksi izin adalah $L/360$ atau (16 ft × 12 in./ft) 360 = 0,53 in. Karena defleksi aktual lebih kecil daripada defleksi izin, maka sistem lantai itu sudah cukup kaku.

Prosedur umum yang sama dapat dilakukan untuk satuan SI. Sebagai contoh:

$$\frac{\text{beban}}{\text{satuan panjang}} = 86{,}5 \text{ lb/ft} = 1262{,}31 \text{ N/m}$$

$$\text{momen lentur} = 2768 \text{ ft-lb} = 3753.4 \text{ N-m}$$

$$\text{tegangan ijin lentur} = F_b = 1200 \text{ lb/in}^2 = 8{,}27 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ukuran balok} = S_{\text{perlu}} = \frac{M}{F_b} = \frac{3753{,}4 \times 10^3 \text{ N-mm}}{8{,}27 \text{ N/mm}^2}$$

$$\frac{bd^2}{6} = S_{\text{perlu}} = 453.857 \text{ mm}^3$$

Apabila b = 38,1 mm (1,5 in.), maka d = 267,34 mm (10,5 in.). Tegangan geser, tegangan tumpu, dan defleksi juga dapat dicek dengan cara sama.

Efisiensi Balok Segiempat Bertinggi Konstan. Ada beberapa hal yang dapat dicatat dari contoh di atas. Salah satunya adalah bahwa balok segiempat tidak efisien. Pada balok ini hanya ada dua titik kecil (titik A dan B dari potongan M–N pada Gambar 6–27) yang mengalami tegangan lentur maksimum. Pada titik-titik lainnya di seluruh bentang balok, material balok ini mengalami tegangan yang relatif tidak besar. Dengan demikian, potensi material tidak digunakan penuh di seluruh bentang balok. Hal ini memang disebabkan oleh sifat distribusi tegangan lentur yang nol pada sumbu netral dan maksimum pada tepi penampang. Dari tinjauan desain, material akan lebih efisien digunakan apabila lebih banyak yang diletakkan jauh dari sumbu netral, misalnya bentuk penampang I.

Alasan kedua, mengapa balok pada contoh di atas tidak efisien adalah ukuran yang ditentukan berdasarkan momen maksimum yang terjadi pada balok (pada penampang M–N). Pada titik-titik potong lain pada balok, momen lentur eksternal lebih kecil (lihat diagram momen lentur). Dengan demikian, penggunaan penampang berdasarkan ini akan tidak efisien pada semua penampang yang momen-

nya tidak maksimum. Dari tinjauan teoritis kita dapat menjadikannya efisien dengan cara membuat ukuran balok yang bervariasi di seluruh bentangnya, bergantung pada gaya internal (dalam hal ini momen lentur) yang ada pada setiap penampang (lihat Bab 6.4.5).

Berikut ini akan dibahas cara-cara menentukan dimensi balok agar material yang digunakan efisien berdasarkan hal-hal yang telah disebutkan di atas.

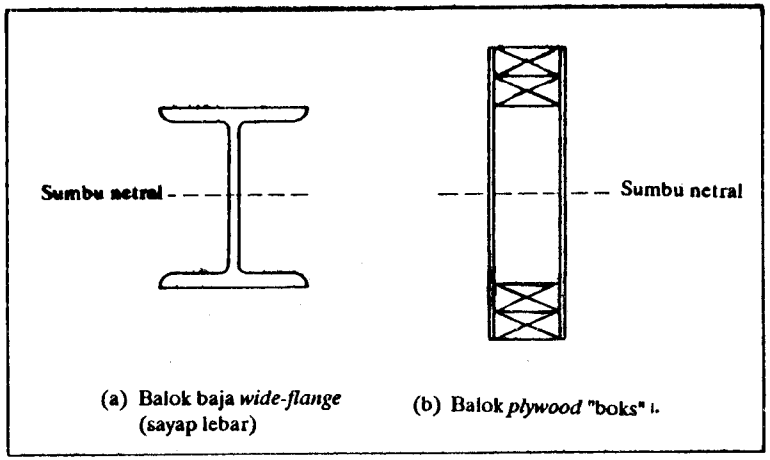
6.4.2 Bentuk-bentuk Penampang Melintang

Seperti telah disebutkan sebelum ini, momen inersia (I) dan modulus penampang (S) merupakan hal penting dalam desain balok. Tujuan desain utama adalah untuk mencari I dan S yang diperlukan untuk memikul beban, dengan konfigurasi penampang melintang yang mempunyai luas sekecil mungkin. Volume total material yang diperlukan untuk memikul beban diusahakan seminimum mungkin. Tujuan alternatif dalam desain adalah mengambil luas penampang tertentu, kemudian mencari bentuk penampang yang memberikan nilai I dan S yang diperlukan. Dengan demikian akan diperoleh penampang yang memberikan kemampuan pikul momen eksternal (jadi juga beban eksternal) semaksimum mungkin.

Prinsip dasar dalam hal mencari momen inersia untuk suatu luas yang diberikan adalah menggunakan definisi momen inersia $I = \int y^2 dA$. Kontribusi elemen luas kecil (dA) terhadap momen inersia penampang bergantung pada kuadrat jarak elemen luas ke sumbu netral penampang. Dengan demikian kita harus mengusahakan agar sebanyak mungkin material terletak jauh dari sumbu netral. Jelas bahwa pada umumnya balok yang mempunyai perbandingan tinggi-lebar lebih besar akan lebih efisien dibandingkan dengan yang perbandingannya kecil.

Pada Gambar 6–28(a) diperlihatkan penampang melintang yang dibuat berdasarkan prinsip yang telah dijelaskan pada paragraf di atas di mana *web* pada penampang digunakan sebagai penghubung dua flens tebal. Pertanyaan yang timbul adalah hingga seberapa tipis *web* dapat dibuat. Untuk itu kita perlu mengingat bahwa tegangan geser maksimum selalu terjadi pada sumbu netral. Jadi, tebal minimum *web* harus dapat memikul tegangan geser yang timbul pada elemen struktur tersebut. Selain itu, ada tegangan utama di bagian tengah balok yang merupakan interaksi dari tegangan geser dan tegangan lentur. Tegangan tekan utama dapat menyebabkan *web* menekuk secara lokal apabila *web* itu terlalu tipis. Balok-balok yang terlihat pada Gambar 6–28(a) merupakan bentuk-bentuk umum yang sudah memperhitungkan faktor-faktor di atas. Penampang pada gambar tersebut terbuat dari baja, dan disebut penampang *wide-flange* (sayap lebar). Penampang ini umum digunakan pada konstruksi gedung di mana tegangan lentur pada umumnya lebih dominan dibandingkan dengan tegangan geser. Apabila gaya geser besar, maka semakin tebal penampang balok yang diperlukan.

Sejauh ini kita baru membahas cara meningkatkan momen inersia penampang (I). Perlu diingat bahwa dalam desain balok, ukuran yang lebih penting adalah perbandingan I/y_{maks} penampang. Dalam hal penampang simetris terhadap sumbu netral, membesarkan nilai I akan berarti pula membesarkan nilai S. Untuk penampang tak simetris, seperti balok T, desainnya harus didasarkan atas kondisi tegangan



GAMBAR 6–28 Bentuk penampang melintang balok. Material diusahakan sebanyak mungkin terletak jauh dari sumbu netral untuk mendapatkan momen inersia maksimum pada penampang, yang berarti pula semakin besar tahanan terhadap lentur.

lentur maksimum pada suatu titik pada penampang balok sama dengan (atau lebih kecil dari) tegangan izin. Titik yang dimaksud adalah titik y_{maks} yang terletak pada salah satu tepi penampang. Di tepi lainnya, yang harga y-nya lebih kecil daripada harga y_{maks}, tegangannya tentu lebih kecil. Dengan demikian penggunaan penampang seperti itu tidak menguntungkan apabila material yang digunakan homogen. Akan tetapi, perlu diingat bahwa hal itu bukan satu-satunya kriteria untuk mengevaluasi penampang karena balok T memang mempunyai keuntungan lain yang akan dibahas pada bagian lain Bab 6 ini, juga pada Bab 6.4.4.

CONTOH

Suatu balok di atas tumpuan sederhana yang terbuat dari baja berpenampang sayap lebar *(wide-flange, WF)* dibebani terbagi merata 600 lb/ft. Anggap bahwa tegangan izin lenturnya adalah F_b = 24000 lb/in.^{2} Tentukanlah ukuran *WF* yang diperlukan berdasarkan tinjuan tegangan lentur.

Solusi:

Momen lentur maksimum:

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{(600 \text{ lb/ft})(25 \text{ ft})^2}{8} = 46875 \text{ ft-lb}$$

Modulus penampang yang diperlukan

$$S = \frac{M}{F_b} = \frac{(46.875 \text{ ft-lb} \times 12 \text{ in./ft})}{24{,}000 \text{ lb/in.}^2}$$

$$= 23{,}4 \text{ in.}^3$$

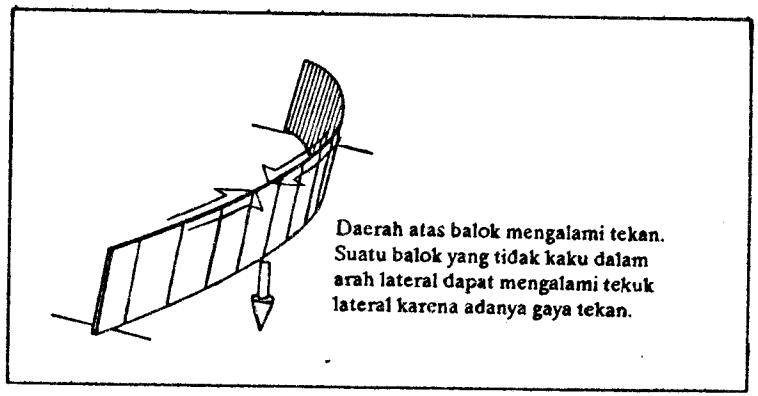
Ukuran balok:
Dengan menggunakan Lampiran A–13 terlihat bahwa kita dapat menggunakan ukuran-ukuran berikut ini:

W 12 X 22 $S = 25{,}3 \text{ in.}^3$
W 8 X 28 $S = 24{,}3 \text{ in.}^3$

Balok yang mempunyai bobot lebih ringan adalah yang lebih ekonomis. Jadi, ukuran *W* 12 X 12 kita pilih untuk maksud tersebut. Pada kenyataannya tegangan geser, defleksi, dan tegangan tumpu juga harus ditinjau.

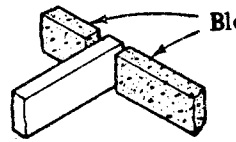
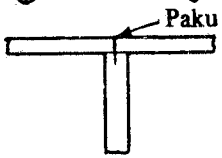
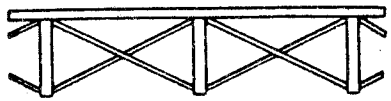
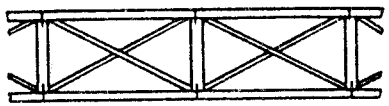
6.4.3 Teluk Lateral pada Balok

Pada pembahasan terdahulu telah disebutkan bahwa balok yang setinggi mungkin pada umumnya menguntungkan karena momen inersia *I* dan modulus penampang *S* akan lebih besar. Tentu saja ada batas berapa tinggi balok dapat dibuat. Batas ini antara lain bergantung pada penggunaan balok itu pada gedung. Ada juga hal lain yang membatasinya. Untuk itu, perhatikan balok tinggi yang terlihat pada Gambar 6–29. Pada balok yang dibebani dapat terjadi tekuk lateral dan terjadi keruntuhan sebelum seluruh kekuatan penampang tercapai. Fenomena tekuk lateral pada balok serupa dengan yang terjadi pada rangka batang. Ketidakstabilan dalam arah lateral terjadi karena gaya tekan yang timbul di daerah atas balok disertai tidak cukupnya kekakuan balok dalam arah lateral. Pada contoh-contoh yang telah dibahas sejauh ini diasumsikan bahwa jenis kegagalan tekuk lateral ini tidak terjadi. Bergantung pada penampang balok, tekuk lateral dapat terjadi pada taraf tegangan yang relatif rendah.



GAMBAR 6–29 Tekuk lateral pada balok. Daerah atas balok mengalami tekan. Balok yang tidak kaku pada arah lateral dapat menekuk secara lateral karena adanya gaya tekan tersebut.

Tabel 6–1. Pengekang Lateral untuk Balok Kayu

Perbandingan tinggi/lebar balok	*Jenis pengekang lateral yang diperlukan*	*Contoh*
2 sampai 1	Tidak ada	
3 sampai 1	Kedua ujung balok harus tetap pada posisinya	
5 sampai 1	Tepi bertekan ditahan secara kontinu	
6 sampai 1	Pengekang diagonal harus digunakan	
7 sampai 1	Kedua tepi balok harus ditahan	

Pencegahan tekuk lateral dapat dilakukan dengan berbagai cara: (1) dengan menggunakan pengaku/pengekang *(bracing)* lateral atau (2) dengan membuat balok cukup kaku dalam arah lateral. Apabila balok digunakan untuk menumpu penutup atap atau sistem sekunder lain, pengekangan dengan sendirinya diberikan oleh elemen sekunder itu. Apabila balok digunakan pada situasi di mana jenis pengekang tersebut tidak mungkin digunakan, maka balok dapat diperkaku dalam arah lateral dengan memperbesar dimensi transversal di daerah atas balok. Pada balok segiempat, proporsi penampang melintang dapat diatur untuk mengontrol tekuk lateral. Penentuan dimensinya secara eksak tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini. Sekalipun demikian, pada Tabel 6–1 diilustrasikan beberapa pengekang lateral yang diperlukan untuk balok kayu.

CONTOH

Sebuah balok kantilever yang panjangnya 10 ft dibebani terpusat 1000 lb pada ujung bebasnya. Jadi, momen maksimum yang timbul pada balok adalah $M = PL$ = (10 ft × 12 in./ft) (1000 lb) = 120.000 in.-ft. Anggap bahwa tegangan izin lentur adalah F_b = 1200 lb/in.^{2} Tentukanlah ukuran balok yang diperlukan.

Solusi:

$$f = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} \quad \text{atau} \quad S_{\text{perlu}} = \frac{M}{F_b}$$

$$\frac{bd^2}{6} = \frac{M}{F_b} = \frac{(120{,}000 \text{ in.-lb})}{1200 \text{ lb/in.}^2} = 100$$

$$bd^2 = 600$$

Setiap balok dengan nilai bd^2 = 600 dapat dipilih untuk memenuhi persyaratan lentur tersebut. Berikut ini dicantumkan tabel beberapa ukuran yang memenuhi hal itu.

Ukuran balok (in.)		*Luas penampang melintang (in.^{2})*	*Perbandingan tinggi/lebar*	*Pengekang lateral*
b	*d*			
20	*5,5*	*110*	*0,27:1*	*Tidak perlu*
10	*7,7*	*77*	*0,77:1*	*Tidak perlu*
5	*11*	*55*	*2,1:1*	*Tidak perlu*
3,5	*13,1*	*46*	*3,7:1*	*Perlu* *
2	*17,2*	*34,4*	*8,6:1*	*Perlu* *

* *Lihat Tabel 6–1*

Sudah jelas dari contoh di atas bahwa ada berbagai penampang balok melintang yang dapat dipilih. Untuk suatu beban yang diberikan, balok yang relatif lebar dan dangkal pada umumnya memerlukan lebih banyak material dibandingkan dengan balok yang relatif tipis dan tinggi. Penentuan pilihan terserah kepada perancang. Selalu ada untung-rugi pada desain (optimisasi). Apabila balok tinggi yang digunakan, maka perancang *harus* menjamin bahwa tekuk lateral dapat dicegah. Pencegahan tekuk lateral ini biasanya memerlukan tambahan material, jadi memerlukan tambahan biaya. Atau, apabila perancang bermaksud tidak menggunakan *bracing*, maka penampang balok yang dipilih harus sedemikian rupa proporsinya sehingga memberikan tahanan terhadap tekuk lateral.

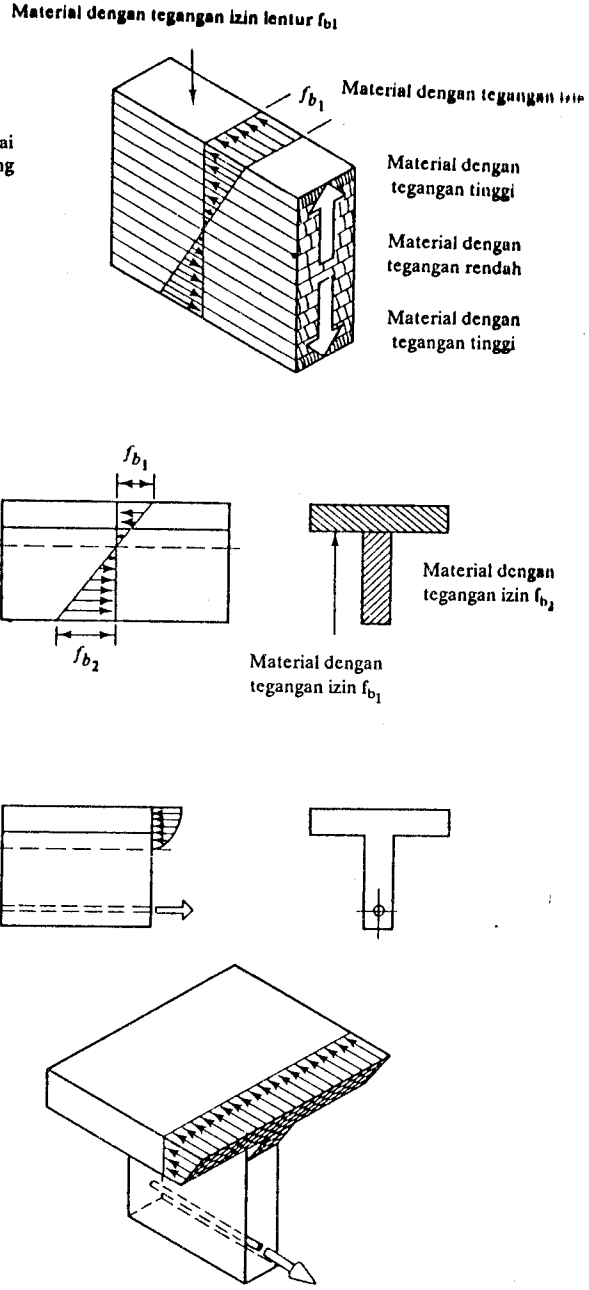
Perlu diingat bahwa apabila suatu balok digunakan untuk menumpu sistem lantai, ukuran yang relatif dangkal (misalnya perbandingan tinggi : lebar = 2 : 1 atau 1 : 1) tidak efisien karena sebenarnya sistem lantai itu sudah memberikan pengekang lateral terhadap balok tersebut. Dengan demikian, untuk penutup lantai kita dapat menggunakan balok yang relatif lebih tipis (perbandingan tinggi : lebar antara 5 : 1 sampai 7 : 1) untuk konstruksi rumah.

6.4.4 Variasi Material pada Penampang Melintang

Terhadap lentur, prinsip umum memindahkan sebanyak mungkin material pada balok jauh dari sumbu netral (seperti yang terjadi pada bentuk sayap lebar) dapat meningkatkan efisiensi balok. Hal ini bukanlah satu-satunya cara mendesain balok untuk meningkatkan efisiensi. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah mengadakan variasi jenis material yang digunakan pada lokasi yang berbeda pada penampang melintang. Pada umumnya hal ini dapat dilakukan pada situasi tertentu. Perhatikan balok kayu lapis yang terlihat pada Gambar 6–30(a). Balok itu terdiri atas lapisan kayu sehingga membentuk suatu penampang komposit. Teknik demikian sering digunakan untuk membuat penampang balok kayu tinggi. Desain penampangnya masih didasarkan atas bahasan pada Bab 6.4.1 (yaitu modulus penampang S yang diperlukan diberikan oleh $S_{\text{perlu}} = M/F_b$ di mana F_b adalah tegangan izin lentur material balok *pada serat terluar balok).*

Kayu mempunyai berbagai mutu jadi mempunyai berbagai tegangan izin. Mutu dengan tegangan izin tinggi pada umumnya diperoleh dari kayu yang mahal. Yang bermutu rendah harganya lebih murah. Hal ini merupakan dasar untuk mendapat penampang ekonomis. Pada distribusi tegangan lentur seperti terlihat pada Gambar 6–30(a), jelas bahwa kita tidak perlu membuat lapisan kayu bermutu sama pada seluruh tinggi penampang. Lapisan yang bermutu tinggi, jadi bertegangan izin tinggi, digunakan pada bagian yang jauh dari sumbu netral. Lapisan-lapisan dalamnya dapat dibuat dari kayu bermutu lebih rendah. Cara desain dengan menggunakan material lebih kuat pada muka terluar dan material kurang kuat di bagian tengah dapat menghasilkan desain yang ekonomis.

Prinsip yang sama juga dapat digunakan secara efektif pada balok T. Telah disebutkan di atas bahwa ketidakefisienan dapat diakibatkan oleh karakter distribusi tegangan lentur yang semakin ke tepi penampang semakin besar. Mempertinggi mutu material pada bagian tepi penampang tentunya akan menambah efisiensi seperti terlihat pada Gambar 6–30(b). Prinsip ini juga menjelaskan alasan penggunaan balok T pada beton bertulang. Penggunaan bentuk T pada umumnya menyebabkan terjadinya tegangan di bagian atas flens relatif lebih kecil daripada di bagian bawah *web* karena lokasi sumbu netral yang agak ke atas. Pada bagian bawah tegangannya akan lebih besar. Hal ini sangat menguntungkan untuk balok beton bertulang karena beton adalah material yang mempunyai kekuatan terhadap tekan jauh lebih tinggi daripada terhadap tarik. Gaya tarik di bagian bawah penampang yang diakibatkan oleh momen lentur eksternal dapat dipikul oleh tulangan baja di bagian bawah penampang T. Jadi, bagian beton di bagian bawah penampang hanya berfungsi menyelimuti tulangan yang diperlukan.



(a) Balok kayu lapis. Lapisan luar mempunyai tegangan izin lentur lebih besar daripada yang tengah.

(b) Balok T: Web dan flens atas terbuat dari mutu kayu berbeda (tegangan izinnya berbeda) yang dicocokkan dengan distribussi tegangan lentur aktual.

(c) Balok beton bertulang T. Bentuk T ini menyebabkan tegangan pada flens atas lebih kecil daripada tegangan pada web. Beton digunakan di atas, dan tulangan baja di bawah.

GAMBAR 6–30 Membuat variasi material pada balok agar sesuai dengan tegangan lentur yang ada.

6.4.5 Variasi Bentuk Balok pada Seluruh Panjangnya

Sebelum ini telah kita tinjau cara membuat balok lebih efisien pada satu penampang melintang. Pada Bab 6.4.5 ini akan dibahas pemberian bentuk yang berbeda pada seluruh panjang balok dengan maksud untuk meningkatkan efisiensinya. Pemberian bentuk ini disesuaikan dengan diagram momen dan diagram geser yang pada umumnya bervariasi di sepanjang balok.

Masalah pemberian variasi bentuk di sepanjang balok sebagai respons terhadap momen dan gaya geser yang ada telah lama dijumpai pada struktur. Pada tahun 1800-an, para ahli telah menemukan balok kantilever yang dibentuk pada seluruh panjangnya, sesuai dengan bidang momennya. Perhatikan balok kantilever yang terlihat pada Gambar 6–31(a), yang memikul beban terpusat pada ujungnya. Misalkan kita akan mencari konfigurasi balok yang didasarkan atas kriteria tegangan lentur yang timbul di tepi atas dan bawah balok harus konstan di sepanjang bentang balok. Hal ini dilakukan dengan menuliskan ekspresi dimensi balok sebagai fungsi dari momen eksternal yang ada pada balok. Ekspresi momen pada balok terhadap titik acuan referensi juga diperlukan. Anggap bahwa bentuk penampang yang digunakan adalah segiempat.

Dimensi balok dinyatakan sebagai fungsi dari M:

$$S = \frac{bd^2}{6} = \frac{M}{F_b} \quad \text{atau} \quad bd^2 = \frac{6M}{F_b}$$

Momen eksternal sebagai fungsi x:

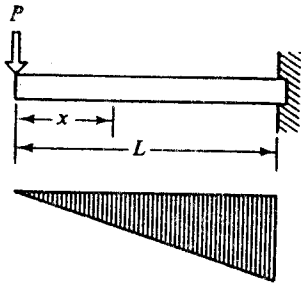
$$M = Px$$

Dengan demikian:

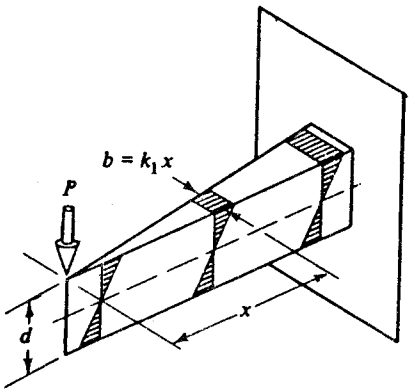
$$bd^2 = \frac{6Px}{F_b} = x\left(\frac{6P}{F_b}\right)$$

Apabila tinggi balok d dianggap konstan, maka lebar b bervariasi langsung terhadap x karena besaran $k_1 = 6P/d^2F_b$ konstan. Dengan demikian, bentuk balok yang diperoleh adalah yang terlihat pada Gambar 6–31(b). Apabila lebar b dianggap konstan, maka tinggi d bergantung pada $\sqrt{x}$ (yaitu $d = \sqrt{x}\,(\sqrt{6P/F_b b} = k_2\sqrt{x})$. Bentuk balok yang diperoleh adalah seperti terlihat pada Gambar 6–31(c). Apabila dianggap bahwa balok harus berbentuk bujursangkar ($b = d$, maka $d^3 = x(6P/F_b)$ atau d bervariasi terhadap $\sqrt[3]{x}$.

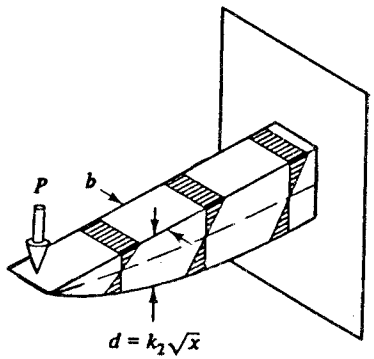
Sekadar untuk membandingkan, sangat berguna mengulang soal di atas pada balok kantilever yang dibebani terbagi rata. Asumsikan pula bahwa penampang segiempat yang digunakan.



(a) Balok kantilever yang dibebani terpusat. $M_x = P_x$.



(b) Balok yang tidak prismatis di sepanjang bentangnya dibuat dengan maksud agar tegangan lentur yang timbul pada serat atas dan bawah konstan. Pada balok ini, tingginya dianggap konstan, sedangkan lebar b bervariasi.



(c) Balok yang mempunyai tegangan lentur konstan. Dalam hal ini, lebar b balok dianggap konstan dan tinggi d balok tidak konstan.

GAMBAR 6–31 Pemberian bentuk balok sebagai respons terhadap distribusi momen.

Dimensi balok sebagai fungsi dari M:

$$S = \frac{bd^2}{6} = \frac{M}{F_b} \quad \text{atau} \quad bd^2 = \frac{6M}{F_b}$$

Momen eksternal sebagai fungsi x:

$$M = \frac{wx^2}{2}$$

Dengan demikian:

$$bd^2 = x^2\left(\frac{6w}{2F_b}\right)$$

Apabila tingginya dianggap konstan, maka lebar b bervariasi terhadap x^2 karena $k_3 = 6w/2F_bd^2$ konstan. Apabila b dianggap konstan, maka d bervariasi langsung terhadap x:

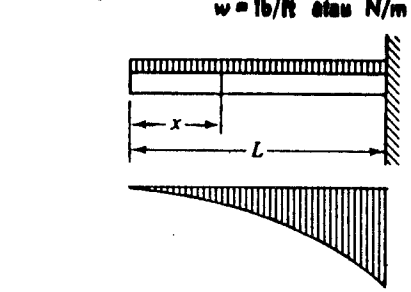
$$d = x\sqrt{\frac{6w}{2F_bb}} = k_4x$$

dan bentuk tersebut terlihat pada Gambar 6–32(c).

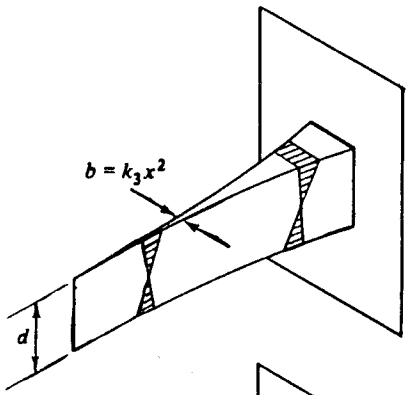
Perlu ditekankan di sini bahwa pemberian bentuk seperti di atas tidak selalu harus ditujukan sebagai respons terhadap beban tertentu. Hanya tegangan lentur yang kita tinjau di atas. Tinjauan tegangan geser, defleksi, dan sebagainya dapat saja dilakukan apabila diperlukan. Banyak sekali respons struktur terhadap suatu kondisi beban, tetapi yang paling banyak digunakan adalah pemberian bentuk berdasarkan respons lentur seperti pada contoh di atas. Hal ini khususnya berguna untuk visualisasi apakah respons struktural aktual sesuai dengan situasi yang diberikan. Sebagai contoh, cocok-tidaknya balok kantilever pada Gambar 6–32(d) dapat langsung dilihat dari respons idealisasi lentur tersebut.

Bentuk yang diperoleh di atas tidak selalu dapat diterapkan pada sembarang balok yang dibebani sama, tetapi bertumpuan lain. Persamaan diagram momen untuk berbagai balok yang berbeda tumpuan akan berbeda sehingga pemberian bentuk pun akan berbeda.

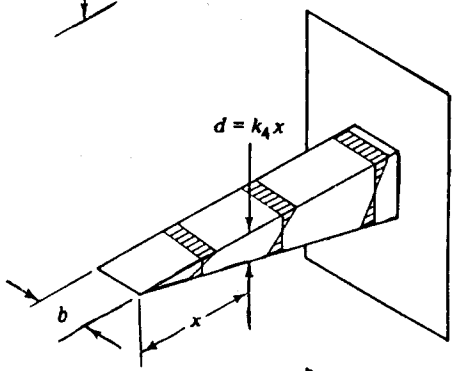
Penampang melintang yang tidak segiempat juga dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan respons idealisasi. Gambar 6–33(b) mengilustrasikan balok sayap lebar yang didesain menurut respons terhadap momen yang ada, dengan menganggap bahwa balok harus mempunyai tinggi penampang tetap dan lebar flens adalah satu-satunya variabel. Adanya variasi lebar flens ini menyebabkan modulus penampang S berubah. Variasi ini harus mengikuti distribusi momen yang ada pada balok agar konfigurasinya memberikan taraf tegangan lentur yang konstan pada flens di seluruh bentang balok.



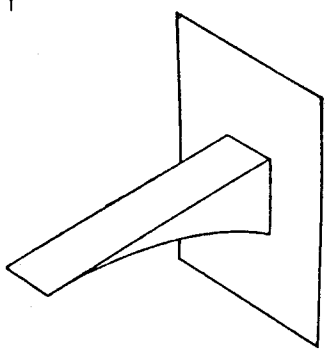
(a) balok kantilever yang dibebani terdistribusi $M_x = wx^2/2$



(b) Balok yang tidak prismatis di sepanjang bentangnya dibuat dengan maksud agar tegangan lentur yang timbul pada serat atas dan bawah konstan. Pada balok ini, tinggi-nya dianggap konstan, sedangkan lebar bervariasi.

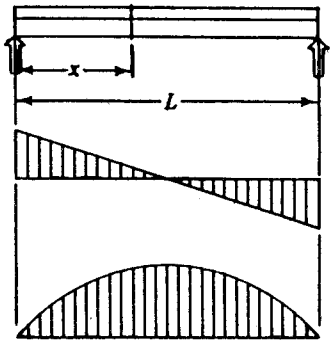


(c) Balok yang mempunyai tegangan lentur konstan. Dalam hal ini, lebar b balok dianggap konstan dan tinggi d balok tidak konstan.

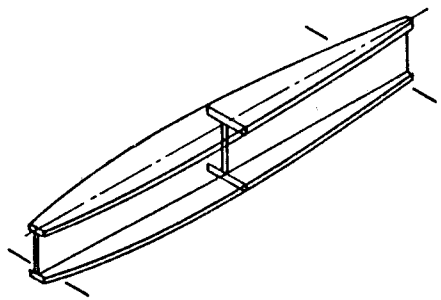


(d) Respons struktural yang tidak layak dilakukan. Memberi pola tinggi balok sesuai dengan diagram momen bukan merupakan hal yang diinginkan dalam desain.

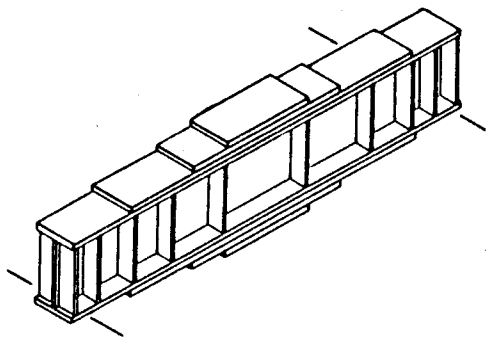
GAMBAR 6–32 Pemberian bentuk balok menurut respons terhadap distribusi momen lentur yang ada.



(a) Kondisi pembebanan terbagi rata.



(b) Bentuk sayap lebar di mana lebar flens bervariasi sesuai dengan kebutuhan modulus penampang untuk momen yang timbul pada setiap penampang.



(c) Balok tersusun. Modulus penampang balok disesuaikan dengan momen yang timbul dengan cara mengubah-ubah tebal flens di sepanjang bentang (dalam hal ini digunakan "plat penutup".

GAMBAR 6–33 Pemberian variasi penampang balok menurut distribusi momen lentur.

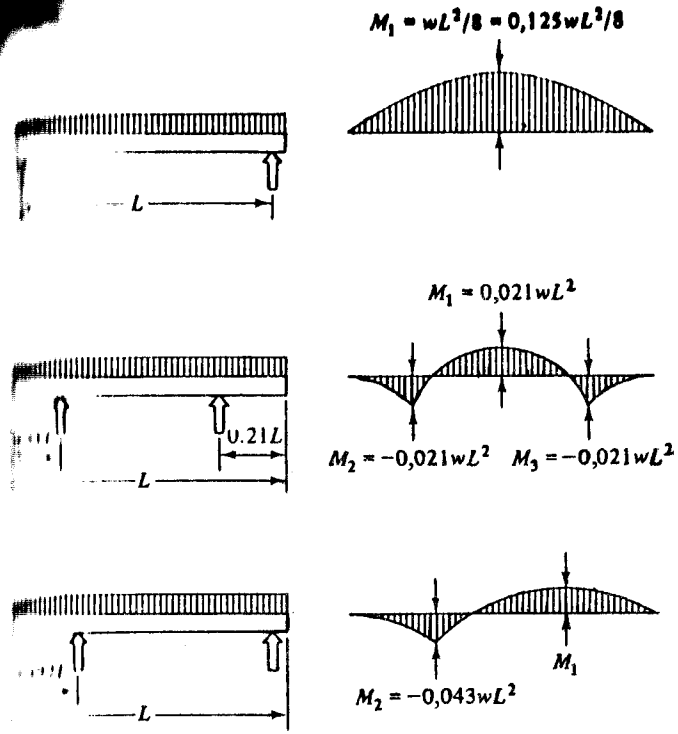
Pada bentuk sayap lebar, tinggi balok dan tebal flens dapat dianggap kons... dan tebal flens dapat berubah. Pada Gambar 6–33(c) diperlihatkan balok tersebut yang dibuat dengan maksud untuk memudahkan pelaksanaan di mana flensnya di buat bervariasi dengan menggunakan plat-plat baja (dilas ataupun dibaut). Dengan demikian, di setiap potongan, modulus penampangnya akan bervariasi, disesuaikan dengan momen yang ada untuk mengusahakan tegangan konstan di sepanjang balok pada tepi flens. Akan tetapi, tegangan tidak dapat benar-benar konstan karena perubahan modulus penampang yang diperoleh dengan perubahan tebal flens itu tidak kontin... (bertahap). Cara penambahan balok sayap lebar dengan plat baja seperti ini (biasa disebut *cover plates*) sangat sering dilakukan dalam praktek.

6.4.6. Variasi Kondisi Tumpuan dan Kondisi Batas

Pembahasan sejauh ini hanya meninjau efisiensi balok tanpa meninjau bagaimana apabila tumpuannya juga diatur. Pengaturan kondisi tumpuan juga mempunyai pengaruh besar terhadap efisiensi penggunaan material. Tujuan langsung pengaturan tumpuan ini ialah mengurangi momen desain atau mengatur distribusinya. Cara klasik mengurangi momen desain adalah dengan mengadakan bagian meminggul (overhang) pada balok. Efek adanya bagian meminggul di satu bagian pada balok di atas dua tumpuan sederhana yang dibebani terbagi rata adalah mengurangi momen positif yang ada, sementara timbul momen negatif pada tumpuan yang diberi *overhang*. Semakin panjang daerah yang meminggul, akan semakin besar momen negatif yang terjadi, dan semakin kecil momen positif. Panjang kantilever yang digunakan dapat saja sedemikian hingga memberikan momen negatif lebih besar dari momen positif nya.

Tentu saja ada panjang bagian meminggul tertentu yang dapat memberikan momen positif secara numerik sama dengan momen negatif. Momen ini tentu saja lebih kecil daripada momen positif apabila tidak menggunakan bagian meminggul, atau menggunakan bagian meminggul yang lebih panjang lagi. Dengan demikian, panjang bagian meminggul (atau kantilever) ini dapat memberikan momen desain minimum.

Gambar 6–34(b) memperlihatkan balok sederhana yang mempunyai berbagai panjang kantilever pada kedua ujungnya. Apabila tidak ada kantilever sama sekali ($x = 0$), jelas bahwa momen desain kritis adalah $M = 0{,}125\ wL^2$ (yaitu momen positif maksimum di lapangan). Apabila kedua ujungnya diberi kantilever dengan panjang tertentu, maka struktur dapat didesain terhadap momen sebesar $M = 0{,}021\ wL^2$ di lapangan dan $M = -0{,}021\ wL^2$ di kedua tumpuan. Kita tidak dapat memperoleh momen lebih kecil lagi untuk balok dan beban yang sama. Pengurangan momen desain ini tentu merupakan desain yang lebih ekonomis. Penentuan panjang kantilever yang memberikan momen positif dan negatif sama ini dapat dilakukan dengan menuliskan persamaan momennya dan menggunakan variabel x. Pada Gambar 6–34(b) diperlihatkan hasil analisis tersebut. Panjang kantilever di setiap sisi balok itu kira-kira seperlima dari seluruh panjang bentang balok.



(a) Balok di atas tumpuan sederhana memikul beban terdistribusi merata: balok harus dirancang memikul momen $wL^2/8$.

(b) Lokasi tumpuan optimum: (dua tumpuan sebagai variabel) lokasi tumpuan adalah sedemikian hingga momen positif dan negatif maksimum sama besar. Dengan demikian balok dapat dirancang memikul momen $0{,}021\ wL^2$, bukan $wL^2/8$. Jadi, ada penghematan material.

(c) Lokasi tumpuan optimum (satu tumpuan sebagai variabel): momen positif maksimum sama dengan momen negatif maksimum juga dapat diperoleh dengan memindahkan satu tumpuan saja. Jadi, balok didesain terhadap momen $M_1 = M_2 < wl^2/8$. Ada penghematan material.

GAMBAR 6–34 Penentuan lokasi tumpuan untuk meminimumkan momen desain pada balok.

Cara yang sama dapat dilakukan apabila hanya satu lokasi yang akan menggunakan bagian meminggul. Panjang kantilever optimum untuk ini adalah sepertiga bentang. Peninjauan di atas merupakan salah satu cara untuk melihat berapa jauh kantilever dapat dibuat. Sekalipun demikian, tinjauan di atas masih harus disertai tinjauan lain. Sebagai contoh, besar defleksi di ujung kantilever juga dapat menentukan berapa jauh kantilever tersebut dapat dibuat. Jenis konstruksi juga penting. Sebagai contoh, untuk balok beton prategang atau pascatarik, patokan berdasarkan kesamaan momen seperti di atas tidak berlaku. Akan tetapi, nilai sepertiga dan seperlima tadi merupakan nilai yang cukup baik dipakai untuk balok dengan bentang sedang dan terbuat dari material homogen.

6.4.7 Prategang dan Pascatarik

Salah satu cara untuk membuat balok lebih efisien yang khususnya cocok untuk struktur beton adalah dengan menggunakan prategang (prestressing) atau pascatarik (post-tensioning). Cara-cara ini merupakan teknik memberikan beban permanen kepada balok secara terkontrol dengan maksud memberikan tegangan yang berlawan-

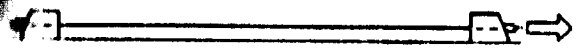
an dengan yang diakibatkan oleh beban eksternal. Konsep dasar pengontrolan hal telah dibahas pada Bab 6.3.6.

Perhatikan tegangan lentur yang timbul pada balok yang telah dibahas dalam Gambar 6–18. Dengan menerapkan gaya aksial pada balok, kita dapat memberikan tegangan tekan yang besarnya cukup untuk mengimbangi tegangan tarik akibat lentur sehingga seluruh bagian penampang hanya mengalami tekan. Hal ini khususnya berguna untuk material beton yang kemampuan pikulnya terhadap tekan jauh lebih besar daripada terhadap tarik. Jadi, dengan membuat seluruh penampang hanya mengalami tekan, berarti penggunaan material secara efisien. Perlu diingat bahwa tegangan tekan akibat lentur dan akibat beban aksial yang diberikan akan saling menambahkan. Jelaslah bahwa cara prategang untuk material yang mempunyai kemampuan pikul tarik sama besar dengan kemampuan pikul tekan (seperti misalnya baja) adalah tidak efisien. Kita dapat juga memberikan eksentrisitas terhadap beban aksial sedemikian hingga tegangan yang ditimbulkan oleh gaya aksial eksentris ini dapat mengimbangi tegangan lentur yang ada secara lebih efektif. Akan tetapi, dalam analisisnya maupun desainnya banyak hal lain yang perlu ditinjau sebagaimana akan diuraikan berikut ini.

Tinjaulah dulu salah satu cara yang umum digunakan dalam memberikan gaya aksial ke elemen struktur, yaitu cara *prategang* (lihat Gambar 6–35). Pada proses ini, yang pada umumnya dilakukan pada lokasi lain, kabel baja berkekuatan tinggi (*wire* atau *tendon*) ditarik di antara dua *piers* sehingga mengalami gaya tarik. Selanjutnya beton dicor pada perancah yang diletakkan di sekitar kabel tersebut. Tahap selanjutnya kabel dipotong. Gaya aksial tarik pada kabel mempunyai efek gaya tekan pada beton (tegangan tarik pada kabel ditransfer ke beton melalui tegangan lekatan). Apabila kabel itu mempunyai eksentrisitas, maka efek pemotongan kabel menimbulkan tegangan seperti terlihat pada Gambar 6–35(c) sehingga balok melentur ke atas. Karena ada lendutan ke atas tersebut, pada saat mengalami beban mati, balok akan mengalami tegangan seperti tergambar. Dengan demikian, tegangan yang terjadi adalah kombinasi, seperti terlihat pada Gambar 6–35(d). Perhatikan bahwa besar gaya prategang yang diberikan harus benar-benar dikontrol karena kesalahan dalam merencanakan gaya prategang dapat menyebabkan balok tidak berfungsi sama sekali. Pada gambar 6–35(e) diperlihatkan balok prategang yang diberi gaya prategang dengan baik dan mengalami beban hidup sehingga distribusi tegangannya seperti tergambar.

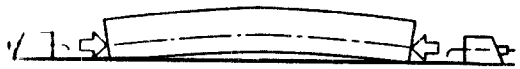
Cara lain yang juga umum digunakan dalam memberikan gaya normal (gaya aksial) adalah *post-tensioning* (pascatarik). Pada cara ini, yang pada umumnya dilakukan pada lokasi elemen struktur tersebut, digunakan selongsong yang ke dalamnya telah dimasukkan kabel yang belum bertegangan. Beton dicor di sekitar selongsong tersebut. Sesudah beton kering, kabel dijepit pada satu ujung dan di-*jack* terhadap betonnya pada ujung lainnya sehingga diperoleh gaya tarik yang diperlukan. Selanjutnya *jack* dilepaskan. Dengan menggunakan *grouting* (penyuntikan) ke dalam selongsong, kabel akan melekat pada selongsong, jadi melekat juga pada beton. Efek akhir cara ini sama saja dengan cara prategang (lihat Gambar 6–36).

Pada kedua cara yang disebutkan di atas sebenarnya banyak masalah yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah efek "rangkak" (creep) pada beton (yaitu de-

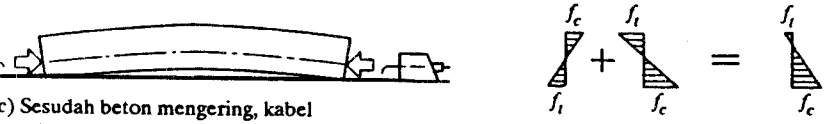


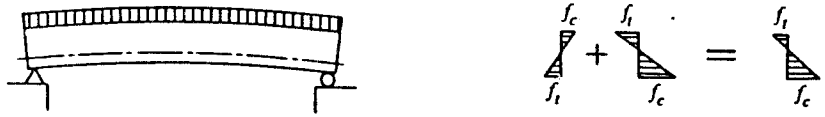
(a) Kabel baja bermutu tinggi diberi pratarik antara *abutments* dengan menggunakan *jacks*.

(b) Beton dicor di sekeliling kabel hingga kering.



(c) Sesudah beton mengering, kabel dipotong. Karena kabel terletak di bagian bawah balok, maka pemotongan ini ekuivalen dengan gaya tekan pada balok di sekitar kabel tersebut. Balok mengalami lentur ke atas.



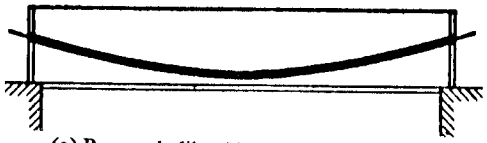


(d) Balok diletakkan pada lokasinya. Pada saat tersebut ada tegangan akibat beban mati dan gaya prategang.

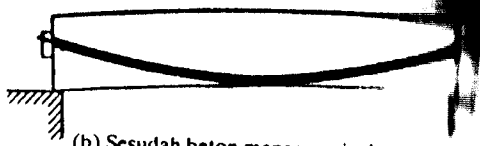
(e) Balok mengalami beban hidup. Beban hidup menyebabkan balok melentur ke bawah. Dengan demikian *sag* akibat beban total dapat dikatakan tidak ada. Pada saat ini tegangan yang ada merupakan kombinasi dari beban mati, beban hidup, dan gaya prategang.

GAMBAR 6–35 Balok beton pratarik.

formasi yang terjadi dengan bertambahnya waktu pada situasi tegangan konstan), yang mempunyai efek mengurangi gaya prategang atau pascatarik. Oleh karena itu, penentuan besarnya gaya kabel harus benar-benar memperhitungkan adanya kemungkinan kehilangan karena rangkak ataupun karena faktor-faktor lainnya. Tinjauan lain yang penting adalah pemberian eksentrisitas pada balok. Eksentrisitas yang konstan (pada Gambar 6–35) di sepanjang balok akan menyebabkan momen



(a) Perancah diletakkan pada lokasi. Selongsong yang berisi kabel tak bertegangan diletakkan pada tempatnya. Beton dicor hingga mengeras.



(b) Sesudah beton mengeras, *jack* dipasang pada kabel, lalu kabel itu ditarik. Hal ini menyebabkan balok melendut ke atas dan melepaskan diri dari lekatan dengan perancah. Perancah dilepas, dan gaya kabel ditetapkan. Biasanya dilakukan *grouting* (penyuntikan) ke dalam selongsong agar ada lekatan antara kabel dengan balok

akibat gaya prategang konstan juga di sepanjang balok, sedangkan telah kita beri bahwa momen akibat beban hidup dan beban mati tidak konstan. Di dekat ujung balok (di ujung-ujung), momen akibat beban mati maupun hidup adalah nol, sedangkan akibat gaya prategang tidak nol. Oleh karena itu, bagian di sekitar ujung ini merupakan daerah yang kritis yang perlu diperhatikan benar. Salah satu keuntungan cara pascatarik dibandingkan dengan cara prategang adalah dalam hal kabel dapat diatur eksentrisitasnya secara lebih mudah, yang dapat mengatasi fenomena tersebut di atas. Pada cara prategang, eksentrisitas tidak konstan sulit dilakukan.

Pada situasi di mana balok mengalami kelengkungan yang terbalik, kita perlu memberi perhatian khusus dalam menggunakan prategang ataupun pascatarik. Pada elemen struktur tipis hal ini diatasi dengan menggunakan kabel yang tidak eksentris jadi berimpit dengan pusat berat elemen struktur itu. Dengan demikian, akibat gaya prategang akan berupa tegangan tekan merata saja. Pada struktur tebal kita dapat mengatasinya dengan membuat kabel pascatarik yang mempunyai eksentrisitas berlawanan karena adanya kelengkungan terbalik itu.

Hal lain yang juga penting adalah kapasitas-pikul-beban batas balok prategang atau pascatarik. Biasanya kriteria utama pada desain balok demikian adalah perilaku nya pada beban kerja atau beban layan. Apabila bebannya melebihi beban layan, maka balok akan mulai berperilaku seperti balok beton bertulang biasa (terjadi retak dan sebagainya). Kekuatan batas balok prategang atau pascatarik tidak jauh berbeda besar daripada yang dimiliki oleh beton bertulang. Dengan demikian, maksud pemberian gaya aksial adalah meningkatkan *performance* balok pada taraf beban kerja atau beban layan. Khususnya, alasan paling nyata dalam penggunaan prategang atau pascatarik adalah memperoleh penampang besar yang efektif untuk defleksi. Pada balok beton bertulang, retak timbul di daerah tarik dan menjalar terus sampai mencapai daerah tekan. Penampang yang telah retak ini sangat mengurangi kekakuan penampang (jadi besar momen inersia I akan sangat berkurang). Pada balok beton prategang atau pascatarik tidak ada tegangan tarik sehingga tidak terjadi retak. Ini berarti seluruh bagian penampangnya mempunyai kontribusi terhadap kekakuan (jadi I dapat dihitung berdasarkan dimensi bruto penampang). Ringkasnya, balok beton prategang atau pascatarik mempunyai kemampuan menahan lendutan lebih besar daripada balok beton bertulang. Selain itu, defleksi ke atas yang diberikan oleh

eksentrisitas gaya aksial tentu berguna juga dalam mengontrol defleksi. Bagaimana pun, desain balok prategang atau pascatarik harus dilaksanakan dengan hati-hati karena kadang-kadang dapat memperlihatkan *springiness*. Dengan desain yang cermat, cara prategang ataupun pascatarik akan dapat memberikan keuntungan lebih banyak dibandingkan dengan beton bertulang.

SOAL

6–1. Diskusikanlah perkembangan metode kuantitatif dalam analisis balok ... lajari literatur lain.

6–2. Tentukan nilai momen inersia, I, dan modulus penampang, S, untuk ... bentuk penampang berikut ini:
(a) Segiempat 4 in. × 10 in.
(b) Segiempat 10 in. × 20 in.
(c) Segiempat 4 in. × 10 in. dengan lubang simetris berukuran ... 12 in.
Untuk setiap penampang, momen inersia yang dihitung cukup ... sumbu kuat saja.
Jawaban:
(a) 333 in.^{4}, 66,6 in.^{3}
(b) 6666 in.^{4}, 666 in.^{3}
(c) 5514 in.^{4}; 551,4 in.^{3}

6–3. Tentukanlah nilai momen inersia terhadap sumbu berat penampang ... yang mempunyai dimensi alas 5 in. dan tinggi 5 in.
Jawaban: 468,75 in.^{4}.

6–4. *Joist* lantai (balok anak) yang mempunyai dimensi penampang ... 1,5 in. × 9,5 in. ditumpu sederhana serta mempunyai bentang 12 ... beban lantai 50 lb/ft^2. Hitunglah jarak as ke as *joist* tersebut agar tegangan lenturnya tidak melebihi 1200 lb/ft^2. Hitunglah berapa beban lantai ... dapat dipikul dengan aman apabila jarak as ke as adalah 16 in. Abaikan beban matinya.

6–5. Tinjaulah balok kantilever yang panjangnya 10 ft dan memikul beban ... pusat 833 lb di ujung bebasnya. Anggap bahwa balok tersebut mempunyai penampang 2 in. × 10 in. dan ada pengekang (bracing) lateral. Gambarkan diagram yang menunjukkan distribusi tegangan lentur pada balok di tumpuan jepit dan setiap 2,5 ft sampai ujung bebas (jadi ada 5 lokasi). Tunjukkan nilai numerik tegangan lentur maksimum di setiap penampang. Lakukan hal serupa untuk tegangan geser. Apa yang akan terjadi pada besar tegangan lentur dan geser apabila lebar balok menjadi dua kali lipat dan tinggi konstan? Apa pula yang terjadi apabila balok itu lebarnya konstan dan tingginya menjadi duakali? ...

6–6. Ulangi soal 6–5, hanya sekarang untuk balok di atas tumpuan sederhana dan bebannya terdistribusi merata sebesar 200 lb/ft.

6–7. Sebuah balok di atas tumpuan sederhana yang panjangnya 12,5 ft memikul beban terdistribusi merata sebesar 100 lb/ft. Anggap balok tersebut ...

ukuran 1,5 in. × 9,5 in. dan dikekang lateral. Anggap pula bahwa balok itu terbuat dari kayu yang mempunyai tegangan izin lentur 1200 lb/in.^{2} dan tegangan izin geser 150 lb/in.^{2} Apakah balok ini aman apabila ditinjau terhadap momen dan geser? Berapakah defleksi maksimum balok? Anggap bahwa $E = 1{,}6 \times 10^6$ lb/in.^{2} Apakah defleksi ini dapat diterima?
Jawaban:

$f_b = 956 < F_b = 1200$ ∴ aman terhadap lentur;
$f_v = 63{,}1 < F_v = 150$ ∴ aman terhadap geser;
$0{,}29 < L/360 = 0{,}4$ ∴ defleksi dapat diterima.

6–8. Sebuah balok baja mempunyai bentang 30 ft dan memikul beban terdistribusi merata 400 lb/ft. Anggap bahwa tegangan izin lentur adalah F_b = 24000 lb/in.^{2} Tentukanlah bentuk sayap lebar (wide-flange) yang paling efisien untuk analisis lentur. Gunakan bentuk-bentuk yang ada pada Lampiran A–13. Abaikanlah beban matinya.

6–9. Anggap bahwa balok kayu lapis berukuran 8 in. × 20 in. tersedia. Berdasarkan tinjauan tegangan lentur saja, berapakah bentang balok yang maksimum yang mungkin dilakukan dengan aman apabila balok itu memikul beban terdistribusi merata 250 lb/ft dan ditumpu sederhana di kedua ujungnya? Bagaimana pula apabila salah satu tumpuannya adalah jepit dan ujung lainnya bebas? Bagaimana pula apabila kedua ujungnya adalah jepit? Anggap bahwa tegangan izin lentur adalah F_b = 2400 lb/in.^{2}, dan balok itu ditumpu lateral secara cukup. Abaikan beban mati. Jawaban: 58,4 apabila ditumpu sederhana.

6–10. Anggap bahwa sederetan balok kayu lapis akan digunakan pada setiap jarak 5 ft as ke as dan memikul beban lantai 60 lb/ft^2 (anggap beban ini sudah termasuk semua beban hidup dan beban mati yang ada). Desainlah secara lengkap balok tersebut. Anggap bahwa tegangan izin lentur adalah F_b = 2200 lb/in.^{2}, tegangan izin geser F_v = 400 lb/in.^{2}, tegangan izin tumpu F_{bg} = 400 lb/in.^{2}, dan modulus elastisitas $E = 1{,}8 \times 10^6$ lb/in.^{2} Buatlah asumsi-asumsi yang diperlukan (misalnya mengenai pengekang lateral), dan ilustrasikanlah dengan sketsa.

6–11. Terhadap tinjauan momen lentur saja, gambarlah sketsa variasi bentuk yang ada pada balok yang memikul dua beban terpusat yang sama pada titik-titik sepertiga bentang dari tumpuan sehingga tegangan lentur yang terjadi di tepi atas dan bawah balok itu konstan. Buatlah sketsa dengan menganggap lebar balok konstan dan tingginya bervariasi, dan gambarlah sketsa lain dengan menganggap tinggi balok konstan dan lebarnya bervariasi.

Bab 7

ELEMEN TEKAN: KOLOM

7.1 PENDAHULUAN

Selain dinding pemikul-beban *(load-bearing walls)*, kolom juga merupakan elemen vertikal yang sangat banyak digunakan, Bahkan dinding pemikul-beban itu sebenarnya dapat dipandang sebagai kolom yang diperluas di satu bidang. Kolom tidak selalu harus berarah vertikal. Meskipun suatu elemen struktur bisa berarah miring, asalkan memenuhi definisi kolom, yaitu beban (aksial) hanya diberikan di ujung-ujungnya dan tidak ada beban transversal, elemen struktur dapat disebut kolom. Dengan demikian, kolom tidak mengalami lentur secara langsung (tidak ada beban tegak lurus terhadap sumbunya).

Kolom dapat dikategorikan berdasarkan panjangnya. *Kolom pendek* adalah jenis kolom yang kegagalannya berupa kegagalan material (ditentukan oleh kekuatan material). *Kolom panjang* adalah kolom yang kegagalannya ditentukan oleh tekuk *(buckling)*, jadi kegagalannya adalah kegagalan karena ketidakstabilan, bukan karena kekuatan. Pada kolom panjang, dimensi dalam arah memanjang jauh lebih besar dibandingkan dengan dimensi pada arah lateral. Karena adanya potensi menekuk pada jenis kolom ini, maka kapasitas pikul-bebannya menjadi lebih kecil. Fenomena tekuk itu sendiri telah lama dikenal sebagai hal yang sangat menarik. Banyak peneliti yang sudah mencari solusi numerik untuk memprediksi secara eksak beban berapakah yang dapat menyebabkan elemen struktur langsing (atau panjang) menekuk. Pada akhirnya masalah ini dipecahkan oleh Leonard Euler (1707 – 1783). Euler adalah seorang matematikawan yang dilahirkan di Switzerland dan mempunyai hubungan dekat dengan keluarga Bernoulli yang kita kenal sebagai ahli matematika juga.

Euler telah meganalisis dengan benar aksi pada elemen struktur panjang langsing, yang dibebani aksial di St. Petersburg, Russia, pada tahun 1759. Bentuk

solusi yang dihasilkannya masih digunakan hingga hari ini. Solusi yang ditemukannya merupakan kontribusi berharga pada teknik struktur, dan hingga kini masih mempunyai bentuk seperti ketika ditemukan oleh Euler.

PRINSIP-PRINSIP UMUM

Kapasitas pikul-beban batas pada elemen struktur tekan bergantung pada panjang relatif dan karakteristik dimensional penampang melintang elemen tersebut (khususnya dimensi terkecil dari penampang melintang), selain juga bergantung pada sifat material yang digunakan. Kolom biasanya diklasifikasikan sebagai pendek atau panjang, bergantung pada nilai relatif antara kedua besaran tersebut.

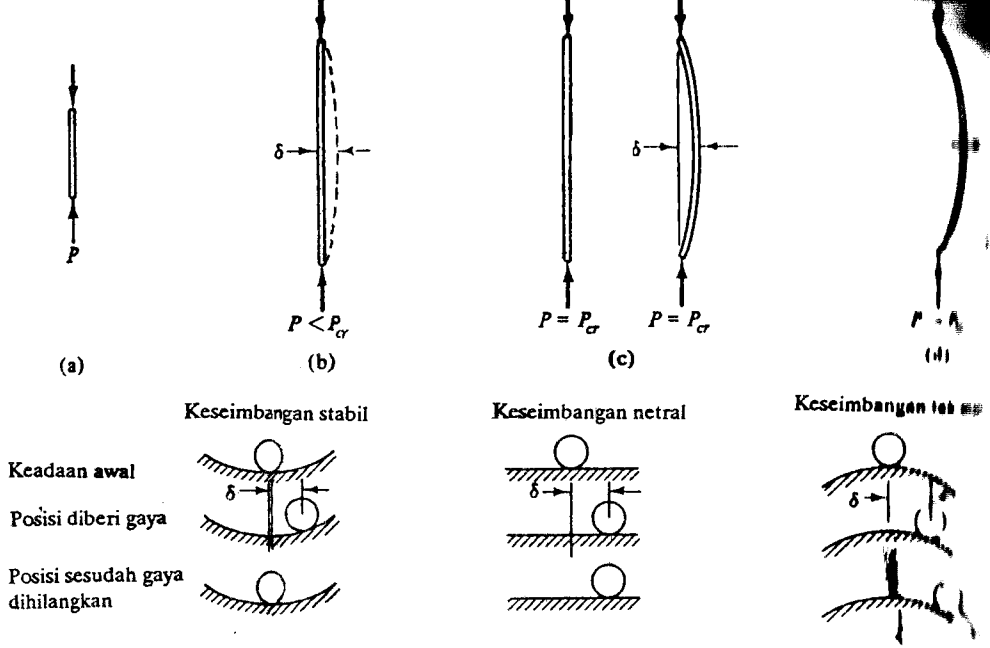
7.2.1 Kolom Pendek

Elemen struktur kolom yang mempunyai nilai perbandingan antara panjangnya dengan dimensi penampang melintang relatif kecil disebut kolom pendek. Kapasitas pikul-beban kolom pendek *tidak bergantung* pada panjang kolom dan, apabila mengalami beban berlebihan, kolom pendek pada umumnya akan gagal karena hancurnya material. Dengan demikian kapasitas pikul-beban batas bergantung pada kekuatan material yang digunakan. Penentuan mana yang termasuk ke dalam kolom pendek dibahas pada Bab 7.3.2. Banyak elemen struktural pada gedung yang dapat disebut kolom pendek, misalnya dinding bata.

7.2.2 Kolom Panjang

Elemen struktur tekan yang semakin panjang akan semakin langsing yang disebabkan oleh proporsinya. Perilaku kolom langsing yang mengalami beban tekan sangat berbeda dengan perilaku kolom pendek.

Perhatikan elemen tekan panjang dan perilakunya terhadap beban tekan yang diilustrasikan pada Gambar 7–1. Apabila bebannya kecil, elemen masih dapat mempertahankan bentuk linearnya, begitu pula apabila bebannya bertambah. Pada saat beban mencapai teraf tertentu, elemen tersebut tiba-tiba tidak stabil, dan berubah bentuk menjadi seperti tergambar. Hal inilah yang disebut fenomena *tekuk (buckling)*. Apabila suatu elemen struktur (dalam hal ini yang kita sebut kolom) telah menekuk, maka kolom tersebut tidak mempunyai kemampuan lagi untuk menerima beban tambahan. Sedikit saja penambahan beban sudah akan dapat menyebabkan elemen struktur itu runtuh. Dengan demikian, kapasitas pikul-beban untuk elemen struktur kolom itu adalah besar beban yang menyebabkan kolom tersebut mengalami tekuk awal. Struktur yang telah mengalami tekuk tidak mempunyai kemampuan layan lagi.



Keseimbangan stabil, netral, dan tak stabil

(a) Kolom pendek: kegagalannya berupa hancurnya material.

(b) Kolom panjang (beban lebih kecil dari beban tekuk) kolom berada dalam keadaan keseimbangan stabil. Apabila kolom mengalami deformasi kecil, dapat kembali ke konfigurasi semula apabila bebannya dihilangkan.

(c) Kolom panjang (beban = beban tekuk); apabila beban pada kolom mencapai beban tekuk kritis, kolom akan berada dalam keadaan keseimbangan netral. Apabila kolom mengalami deformasi dari konfigurasi linear, maka akan tetap pada konfigurasi baru (tidak kembali ke konfigurasi linear). Beban tekuk adalah beban maksinum yang dapat dipikul oleh kolom.

(d) Kolom panjang (beban lebih besar daripada beban tekuk): apabila beban pada kolom lebih besar dari pada beban tekuk kritis, kolom berada dalam keseimbangan tak stabil. Kolom akan terus berdeformasi pada beban konstan sampai akhirnya runtuh.

GAMBAR 7–1 Perilaku kolom yang dibebani.

Fenomena tekuk merupakan hal yang menarik. Tekuk adalah suatu bentuk kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan suatu elemen struktur yang dipengaruhi oleh aksi beban. Kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan dapat terjadi pada berbagai material. Pada saat tekuk terjadi, taraf gaya internal dapat sangat rendah. Fenomena tekuk berkaitan dengan *kekakuan* elemen struktur. Suatu elemen yang mempunyai kekakuan kecil lebih mudah mengalami tekuk dibandingkan dengan yang mempunyai kekakuan besar. Semakin panjang suatu elemen struktur, semakin kecil kekakuannya.

Apabila suatu elemen struktur mulai tidak stabil, seperti halnya kolom yang mengalami beban tekuk, maka elemen tersebut tidak dapat memberikan gaya tahanan internal lagi untuk mempertahan konfigurasi linearnya. Gaya tahanannya lebih kecil daripada beban tekuk. Pada Gambar 7–1 diperlihatkan sistem yang stabil, tidak stabil, dan berada dalam keadaan keseimbangan netral. Kolom yang tepat berada dalam keadaan mengalami beban tekuk sama saja dengan sistem yang berada dalam keadaan keseimbangan netral. Sistem dalam keadaan demikian tidak mempunyai kecenderungan mempertahankan konfigurasi semula.

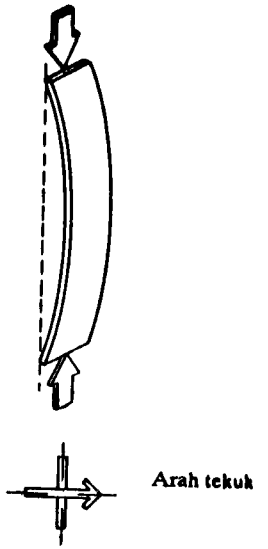
Banyak faktor yang mempengaruhi beban tekuk (beban ini disebut P_{cr}) suatu elemen struktur tekan panjang. *Panjang kolom*, tentu saja merupakan faktor penting. Pada umumnya kapasitas pikul-beban kolom berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen. Selain itu, faktor lain yang menentukan besar beban tekuk (beban yang dapat menyebabkan suatu kolom menekuk) adalah yang berhubungan dengan karakteristik kekakuan elemen struktur (jenis material dan bentuk serta ukuran penampang).

Kekakuan elemen struktur sangat dipengaruhi oleh banyaknya dan distribusi material yang ada. Pada elemen struktur segi-empat seperti terlihat pada Gambar 7–2(a), jelas (menurut eksperimen maupun teori) bahwa elemen struktur akan selalu menekuk pada arah seperti terlihat pada gambar itu. Elemen struktur itu kurang kaku terhadap sumbu ini dibandingkan dengan terhadap sumbu lainnya. Penampang simetris (misalnya bujursangkar, lingkaran) tidak mempunyai arah tekuk khusus seperti pada penampang segiempat. Dengan meninjau elemen struktur berpenampang segiempat tipis yang mempunyai dua sumbu utama, terlihat bahwa elemen itu lebih sedikit mempunyai kemampuan menahan lentur terhadap satu sumbu daripada terhadap sumbu lainnya. Elemen itu cenderung menekuk *terhadap* sumbu lemah (yang diasosiasikan dengan kemampuan lebih kecil untuk memikul lentur). Akan tetapi, elemen tersebut dapat juga mempunyai kekakuan cukup pada sumbu lainnya untuk menahan tekuk. Dengan demikian, kapasitas pikul-beban elemen tekan tidak hanya bergantung pada banyaknya material yang ada pada penampang, seperti halnya yang terjadi pada batang tarik, tetapi juga pada distribusi material (bentuk, ukuran penampang). Ukuran distribusi ini pada umumnya dapat dinyatakan *dengan momen inersia I* yang menggabungkan banyak material yang ada dengan distribusinya. Momen inersia dibahas secara rinci pada Bab 6 dan Lampiran 3.

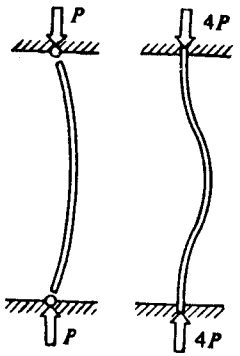
Faktor lain yang sangat penting dalam mempengaruhi besarnya beban tekuk adalah *kondisi ujung* elemen struktur (lihat Gambar 7–2(b). Apabila ujung-ujung suatu kolom bebas berotasi, kolom tersebut mempunyai kemampuan pikul-beban lebh kecil dibandingkan dengan kolom sama yang ujung-ujungnya dijepit, Adanya tahanan ujung menambah kekakuan sehingga juga meningkatkan kestabilannya mencegah tekuk. Mengekang (menggunakan *bracing*) suatu kolom pada suatu arah juga meningkatkan kekakuan. Faktor-faktor penting ini dibahas secara rinci pada Bab 7.3.2.

Sifat material juga mempengaruhi kapasitas pikul-beban elemen. Ada jenis material yang lebih kaku (dan berdeformasi lebih kecil) daripada jenis material lain untuk suatu beban yang sama. Ukuran yang menentukan hal ini adalah *modulus elastisitas E*. Semakin tinggi nilai E, akan semakin tinggi pula kekakuannya, yang

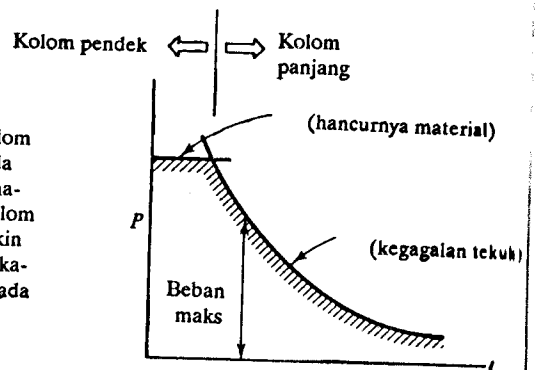
(a) Kolom panjang yang mempunyai kekakuan lebih besar terhadap satu sumbu (disebut sumbu kuat) dibandingkan dengan terhadap sumbu lainnya (disebut sumbu lemah) akan menekuk terhadap sumbu lemah.



(b) (b) Kondisi ujung sangat mempengaruhi besar beban kritis. Apabila kedua kolom identik, hanya berbeda kondisi ujungnya, maka kolom yang mempunyai ujung jepit dapat memikul beban lebih besar daripada kolom berujung sendi.



(c) Hubungan umum antara panjang kolom dengan beban tekuk. Kegagalan pada kolom pendek adalah kehancuran material, sedangkan kegagalan pada kolom panjang adalah karena tekuk. Semakin panjang suatu kolom, semakin kecil kapasitas pikul bebannya, khususnya pada kolom panjang.



GAMBAR 7–2 Kolom panjang: Bentuk penampang melintang, material yang digunakan, kondisi ujung, dan panjang elemen struktur, semuanya sangat mempengaruhi kapasitas-pikul-beban kolom yang bersangkutan.

berarti semakin besar tahanan kolom yang terbuat dari material itu untuk mencegah tekuk. Pada Bab 2.5.3 modulus elastisitas dibahas secara lebih rinci.

7.2.3 Rangkuman

Dalam bentuk rangkuman, Gambar 7–2(c) mengilustrasikan hubungan antara kapasitas pikul-beban dan panjang elemen struktur yang mengalami tekan. Seperti terlihat, fenomena tekuk pada umumnya menyebabkan terjadinya pengurangan kapasitas pikul-beban elemen tekan. Bentuk kurva tekuk yang digambarkan mengilustrasikan bahwa kapasitas pikul-beban elemen tekan panjang berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen itu. Beban maksimum yang dapat dipikul kolom pendek ditentukan oleh hancurnya material (bukan tekuk). Beban ini diberikan oleh $P_y = AF_y$ di mana A adalah luas penampang melintang kolom dan F_y adalah tegangan leleh material. Sebaliknya, pada kolom panjang atau langsing, kegagalan yang terjadi akan disebabkan oleh beban yang lebih kecil daripada beban yang menyebabkan hancurnya material. Ini berarti bahwa tegangan aktual yang ada apabila tekuk terjadi pada kolom panjang (tegangan tekuk kritis) selalu lebih kecil daripada tegangan leleh (yaitu $f_{cr} = P_{cr}/A \leqslant f_{leleh}$). Kegagalan pada kolom panjang adalah yang disebabkan oleh tekuk, jadi tegangan yang terjadi pada saat gagal lebih kecil daripada tegangan leleh material kolom tersebut.

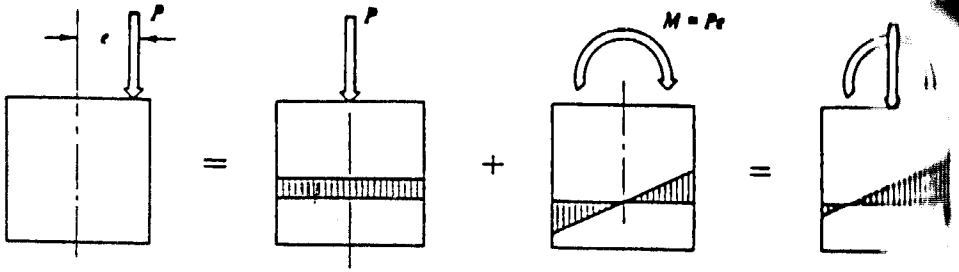
Perlu selalu diingat bahwa tegangan aksial aktual yang ada pada kolom simetris, panjang maupun pendek, selalu diberikan oleh $f = P/A$. Taraf tegangan pada saat kegagalan terjadi bergantung pada panjang atau pendeknya kolom itu.

ANALISIS ELEMEN TEKAN

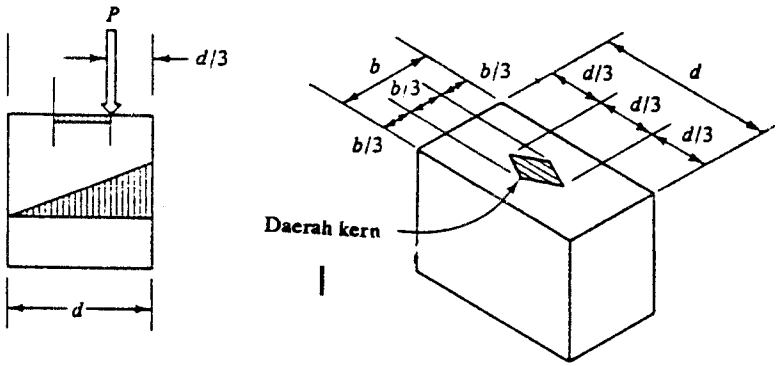
7.3.1 Kolom Pendek

Beban Aksial. Elemen tekan yang mempunyai potensi kegagalan karena hancurnya material (tegangan langsung) dan mempunyai kapasitas pikul-beban tak bergantung pada panjang elemen, relatif lebih mudah untuk dianalisis. Apabila beban yang bekerja bertitik tangkap tepat pada pusat berat penampang elemen, maka yang akan timbul adalah tegangan tekan merata yang besarnya $f = P/A$. Kegagalan akan terjadi apabila tegangan langsung aktual ini melebihi tegangan hancur material ($f_a \geqslant F_y$).

Beban Eksentris. Apabila beban bekerja eksentris (yaitu tidak bekerja di pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek beban eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka di seluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik.



(a) Distribusi tegangan akibat beban eksentris



(b) Apabila beban bertitik tangkap di daerah sepertiga tengah penampang segiempat, maka di seluruh penampang hanya ada tegangan tekan. Apabila beban di luarnya, maka ada bagian penampang yang mengalami tegangan tarik.

GAMBAR 7–3 Beban eksentris.

Perhatikan elemen yang terlihat pada Gambar 7–3 yang mengalami beban eksentris P sejauh e dari sumbu berat elemen. Tegangan yang ditimbulkan oleh beban ini dapat diperoleh dengan menguraikan beban eksentris itu menjadi gaya aksial sentris (yang hanya akan menghasilkan tegangan merata f_a) serta momen (kopel) yang hanya menghasilkan tegangan lentur f_b. Uraian gaya tersebut diperlihatkan pada Gambar 7–3. Tegangan aktual tentunya merupakan kombinasi dari kedua distribusi tegangan.

$$\text{tegangan merata} = f_a = \frac{P}{A}$$

$$\text{tegangan lentur} = f_b = \frac{Mc}{I}$$

karena

$$M = Pe$$

$$f_b = \frac{(Pe)c}{I}$$

maka tegangan gabungan = $f_{aktual} = f_a + f_b = \pm\frac{P}{A} \pm \frac{(Pe)c}{I}$

Dengan memperhatikan distribusi tegangan yang diilustrasikan pada Gambar 7–3 terlihat bahwa besar tegangan lentur sebanding dengan eksentrisitas e beban. Pada gambar tersebut, beban vertikal P dapat menimbulkan tegangan tarik pada satu bagian penampang apabila eksentrisitasnya besar (yaitu tegangan lentur f_b dominan dibandingkan dengan tegangan aksial). Apabila $e = 0$, jelas hanya akan terjadi tegangan f_a. Oleh karena itu, tentu ada suatu batas eksentrisitas beban yang apabila beban bekerja pada batas itu, tegangan di seluruh penampang hanya berupa tegangan tekan. Dengan mudah titik itu dapat diperoleh dengan menuliskan kombinasi kedua jenis tegangan sama dengan nol ($f_a + f_b = 0$) dan menghitung eksentrisitasnya. Jadi, $P/A + (Pe)y/I = 0$ atau $e = I/Ac$. Untuk penampang segiempat (lihat Gambar 7–3):

$$\frac{P}{bd} = \frac{Pe(d/2)}{bd^3/12} \quad \text{dan} \quad e = \frac{d}{6}$$

Dengan demikian, apabila beban bekerja di dalam daerah yang dibatasi ini, tegangan yang akan timbul hanyalah tegangan tekan, tidak ada tegangan tarik. Dengan menempatkan beban tepat pada titik batas tersebut ($e = d/6$), maka tegangan di tepi sisi lawannya akan sama dengan nol. Apabila eksentrisitasnya melampaui batas itu, akan timbul tegangan tarik pada sisi lawannya. Perhatikan bahwa karena beban dapat mempunyai titik tangkap di kedua sisi penampang, maka titik Kern juga ada di kedua bagian. Lokasinya adalah pada titik-titik sepertiga penampang. Oleh karena itu, ada yang disebut *aturan sepertiga-tengah*, yang berarti mengusahakan agar beban mempunyai titik tangkap di dalam sepertiga tengah penampang agar tidak terjadi tegangan tarik. Apabila kita meninjau pula arah lainnya (tegak lurus dari yang telah kita bahas), jelaslah bahwa kita akan memperoleh *daerah Kern* seperti terlihat pada Gambar 7–3.

Penampang Komposit. Sering dijumpai beberapa jenis material digunakan untuk membentuk elemen tekan. Beton bertulang merupakan contoh yang amat jelas. Dalam hal demikian, beban tekan dipikul oleh material-material yang ada. Pada kolom beton bertulang, baik beton maupun tulangan baja akan berdeformasi sama besar apabila dibebani karena kedua-duanya melekat bersama. Dengan demikian, tegangan yang terjadi pada masing-masing material harus sedemikian besarnya agar deformasi keduanya cocok. Karena baja mempunyai kekakuan lebih besar daripada beton, maka tegangan yang terjadi pada baja harus lebih besar daripada yang ada pada beton agar deformasi tadi sesuai (lihat Bab 2.6). Dengan demikian tulangan

baja pada kolom beton bertulang memikul porsi tegangan jauh lebih besar bandingkan dengan porsi yang diterima oleh beton. Pembaca dapat mempelajari ini pada berbagai literatur lain.[1]

Kolom beton bertulang mempunyai efek rangkak (creep) (lihat Bab 2.6) rangkak dapat menyebabkan taraf tegangan yang terjadi berubah terhadap waktu (dari waktu ke waktu tegangan pada beton berkurang, dan tegangan pada baja bertambah). Banyak literatur yang telah membahas masalah rangkak ini.[2]

7.3.2 Kolom Panjang

Analisis yang dibahas terdahulu hanya berhubungan dengan kekuatan. Pada Bab 7.3.2 ini kita akan membahas metode untuk menganalisis perilaku kolom panjang yang mengalami tekuk.

Tekuk Euler. Seperti telah disebutkan pada awal Bab 7 ini, Leonard Euler adalah orang pertama yang memformulasikan ekspresi beban tekuk kritis pada kolom. Beban kritis tekuk untuk kolom yang ujung-ujungnya sendi, yang disebut sebagai *beban tekuk Euler,* adalah:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

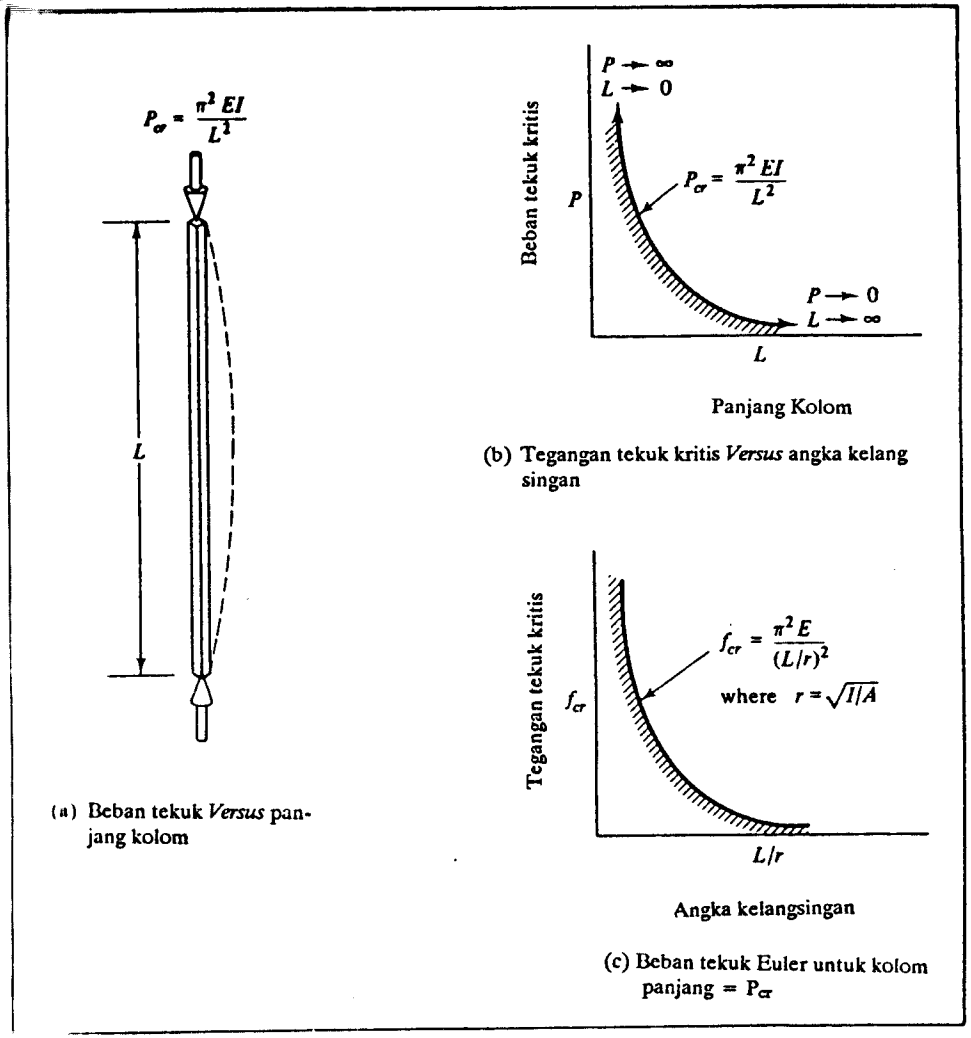
di mana

E = modulus elastisitas
I = momen inersia
L = panjang kolom di antara kedua ujung sendi
π = konstanta pi = 3,1416

Penurunan ekspresi ini tercantum pada Lampiran 12. Ekspresi ini memperlihatkan dengan jelas bahwa kapasitas pikul-beban suatu kolom selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen, sebanding dengan modulus elastisitas material, dan sebanding dengan momen inersia penampang melintang. Momen inersia yang dimaksud adalah yang minimum terhadap sumbu berat penampang apabila kolom tersebut tidak dikekang secara khusus (unbraced).

Dengan menggunakan ekspresi tekuk Euler kita dapat memprediksi bahwa apabila suatu kolom menjadi sangat panjang, beban yang dapat menimbulkan tekuk pada kolom menjadi semakin kecil menuju nol (lihat Gambar 7–4). Sebaliknya apabila panjang kolom semakin kecil menuju nol, maka beban yang diperlukan untuk menyebabkan kolom itu menekuk semakin besar. Apa yang sebenarnya terjadi tentu saja apabila kolom semakin pendek, ragam kegagalan yang akan terjadi

1. F.L. Singer, *Strength of Materials,* ed. ke-2, Harper & Row, New York, 1962.
2. P.M. Ferguson, *Reinforced Concrete Fundamentals,* ed. ke-3, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973.



GAMBAR 7–4 Tekuk Euler pada kolom panjang.

bukanlah tekuk, melainkan hancurnya material. Dengan demikian, ekspresi Euler tidak berlaku lagi untuk kolom pendek. Pada kolom pendek ini yang lebih menentukan adalah tegangan hancur material, bukan ekspresi Euler.

Kebergantungan beban tekuk pada kebalikan kuadrat panjang kolom merupakan faktor yang amat penting. Kolom yang panjangnya dua kali semula akan berkurang kapasitas pikul-bebannya menjadi seperempatnya. Sebaliknya, apabila panjangnya menjadi setengahnya, maka kapasitas pikul-bebannya akan menjadi empat kali lipat. Jelas bahwa beban tekuk kolom sangat peka terhadap panjang kolom.

CONTOH

Tentukanlah beban tekuk kritis kolom baja 2 in. x 2 in. (50,8 mm x 50,8 mm) yang panjangnya 180 in. (4572 mm) dan ujung-ujungnya sendi. Anggap bahwa $E = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in.^{2} ($0{,}204 \times 10^6$ N/mm^2).

Solusi:

Momen inersia I_x atau I_y:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{2 \text{ in. } (2 \text{ in.})^3}{12} = 1{,}33 \text{ in.}^4$$

$$= \frac{50{,}8 \text{ mm}(50.8 \text{ mm})^3}{12} = 555 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

Karena $I_x = I_y$, maka kolom mempunyai kecenderungan menekuk sama terhadap kedua sumbu, atau terhadap diagonal, karena nilai I yang sama dengan I_x dan I_y

Beban tekuk kritis:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2(29{,}6 \times 10^6 \text{ lb/in.}^2)(1{,}33 \text{ in.}^4)}{(180 \text{ in.})^2} = 12.000 \text{ lb}$$

$$= \frac{\pi^2(204.000 \text{ N/mm}^2)(555.000 \text{ mm}^4)}{(4572 \text{ mm})^2} = 53.458 \text{ N}$$

Taraf tegangan aktual pada saat beban tekuk kritis ini adalah:

$$f = \frac{P}{A} = \frac{12.000 \text{ lb}}{2 \text{ in. } \times 2 \text{ in.}} = 3000 \text{ lb/in.}^2$$

$$= \frac{53.458 \text{ N}}{50{,}8 \text{ mm } \times 50{,}8 \text{ mm}} = 20{,}7 \text{ N/mm}^2$$

Terlihat jelas bahwa kolom mengalami tekuk pada taraf tegangan yang relatif masih sangat rendah.

CONTOH

Pada panjang berapakah kolom bujursangkar pada contoh di atas bukan lagi mengalami kegagalan tekuk, melainkan kegagalan hancurnya material (berapakah panjang transisi antara kolom pendek dan kolom panjang)? Anggap bahwa tegangan leleh baja adalah $F_y = 36000$ lb/in.^{2} (248 N/mm^2).

Solusi:

Batas beban yang memberikan kegagalan karena hancurnya material:

$$P_{max} = F_y A = (36.000 \text{ lb/in.}^2)(2 \text{ in. } \times 2 \text{ in.}) = 144.000 \text{ lb}$$

$$= (248 \text{ N/mm}^2)(50{,}8 \text{ mm } \times 50{,}8 \text{ mm}) = 640 \text{ kN}$$

Panjang tekuk untuk P_{maks} ini:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

$$= P_{max}$$

$$144{,}000 \text{ lb} = \frac{\pi^2(29{,}6 \times 10^6 \text{ lb/in.}^2)(1{,}33 \text{ in.}^4)}{L^2} \qquad \therefore L = 52 \text{ in.}$$

$$= 640.000 \text{ N} = \frac{\pi^2(204.000 \text{ N/mm}^2)(555.000 \text{ mm}^4)}{L^2} \qquad \therefore L = 1320 \text{ mm}$$

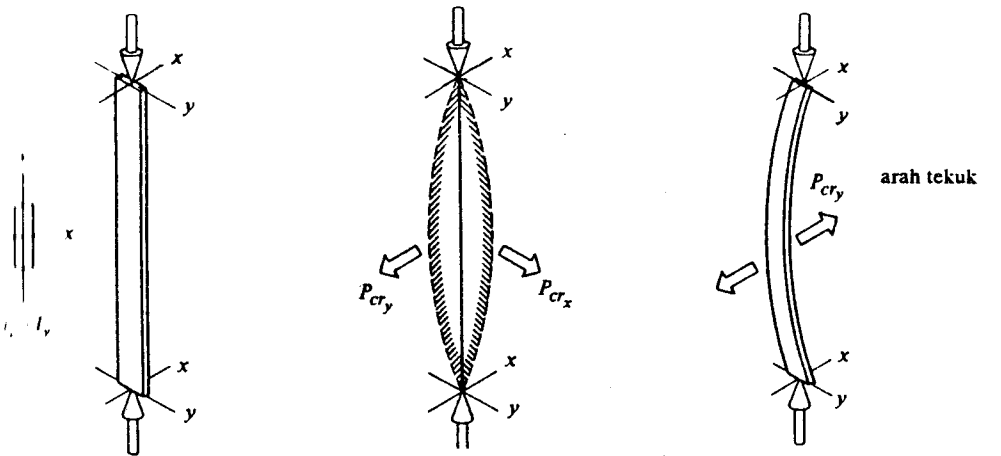
Dengan demikian:

Untuk $L < 52$ in. (1320 mm) kegagalan kolom adalah karena hancurnya material.

Untuk $L > 52$ in. (1320 mm) kegagalan kolom adalah karena tekuk.

Untuk $L = 52$ in. (1320 mm) kedua ragam kegagalan dapat terjadi.

Pada kenyataannya transisi yang terdefinisi eksak seperti di atas tidak mungkin terjadi.



(a) Momen inersia terhadap satu sumbu lebih besar daripada terhadap sumbu lain.

(b) Kolom mempunyai potensi untuk gagal karena tekuk terhadap masing-masing sumbu. Akan tetapi, beban yang dapat menyebabkan terjadinya tekuk terhadap sumbu kuat lebih besar daripada beban yang dapat menyebabkan terjadinya tekuk terhadap sumbu lemah.

(c) Dengan demikian, kolom akan menekuk pada P_{cr} terhadap sumbu y, yaitu $\pi^2 EI_y/L^2$ yang arah tekuknya seperti tergambar.

GAMBAR 7–5 Tekuk pada penampang melintang tak simetrik.

Apabila suatu kolom yang tak dikekang adalah tak simetris, kita perlu memperhatikan adanya momen inersia yang berbeda pada kolom tersebut (lihat Gambar 7–5). Kolom demikian pada umumnya akan menekuk dalam arah dimensi terkecil atau, lebih tepat lagi, terhadap sumbu lemahnya. Sebagai contoh, kolom segiempat selalu mempunyai dua momen inersia utama, I_x dan I_y. Beban yang dapat menyebabkan tekuk pada kedua arah tersebut kita tulis P_{cr_x} dan P_{cr_y}. Beban yang sebenarnya dapat menyebabkan terjadinya tekuk pada kolom segiempat adalah yang terkecil di antara kedua-duanya:

$$P_{cr_x} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2} \qquad \text{dan} \qquad P_{cr_y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2}$$

CONTOH

Tentukanlah beban tekuk kritis untuk kolom yang mempunyai luas penampang melintang sama dengan contoh sebelum ini, tetapi bentuknya segiempat: h = 1 in, d = 4 in. (25,4 mm x 101,6 mm). Anggap bahwa L = 180 in. (4572 mm), E = 29,6 x 10^6 lb/in.^{2} (204000 N/mm^2).

Solusi:

Momen inersia:

$$I_x = \frac{bd^3}{12} = \frac{(1)(4^3)}{12} = 5{,}33 \text{ in.}^4$$

$$= \frac{(25{,}4 \text{ mm})(101{,}6 \text{ mm})^3}{12} = 2{,}20 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_y = \frac{db^3}{12} = \frac{(4)(1^3)}{12} = 0{,}33 \text{ in.}^4$$

$$= \frac{(101{,}6 \text{ mm})(25{,}4 \text{ mm})^3}{12} = 0{,}139 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Beban tekuk kritis:
Beban yang dapat menyebabkan tekuk terhadap sumbu x:

$$P_{cr_x} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2}$$

$$= \frac{\pi^2(29{,}6 \times 10^6)(5{,}33)}{(180)^2} = 48.060 \text{ lb}$$

$$= \frac{\pi^2(204.000 \text{ N/mm}^2)(2{,}20 \times 10^6 \text{ mm}^4)}{(4572 \text{ mm})^2} = 213{,}8 \text{ kN}$$

Beban yang dapat menyebabkan tekuk terhadap sumbu y:

$$P_{cr_y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2}$$

$$= \frac{\pi^2(29{,}6 \times 10^6)(0.33)}{(180)^2} = 2975{,}5 \text{ lb}$$

$$= \frac{\pi^2(204.000 \text{ N/mm}^2)(0{,}139 \times 10^6 \text{ mm}^4)}{(4572 \text{ mm})^2} = 13{,}3 \text{ kN}$$

Karena beban yang lebih kecil adalah beban yang menyebabkan tekuk terhadap sumbu y, maka beban kritis pada kolom tersebut adalah P_{cr} = 2975,5 lb (13,3 kN). Kolom itu akan menekuk pada arah dimensi terkecil. Dibandingkan dengan kolom pada contoh sebelum ini (yang luas penampangnya sama, hanya berbeda bentuknya), kapasitas pikul-beban kolom berpenampang segiempat jauh lebih kecil.

Untuk keperluan desain, ekspresi Euler sering juga dituliskan dalam bentuk agak lain. Beban tekuk kritis untuk kolom dapat dinyatakan dalam *tegangan tekuk kritis* f_{cr}, yaitu dengan membagi ekspresi Euler dengan luas A. Jadi, $f_{cr} = P_{cr}/A = \pi^2 EI/AL^2$. Ekspresi terakhir ini mengandung dua besaran yang menyangkut dimensi penampang, yaitu I dan A. Kita dapat menggabungkannya menjadi satu besaran penampang saja yang kita sebut sebagai *jari-jari girasi* r dan *didefinisikan* sebagai $r = \sqrt{I/A}$. Perhatikan bahwa $I = Ar^2$. Dengan demikian tegangan kritis kolom dapat ditulis sebagai:

$$f_{cr} = \frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2}$$

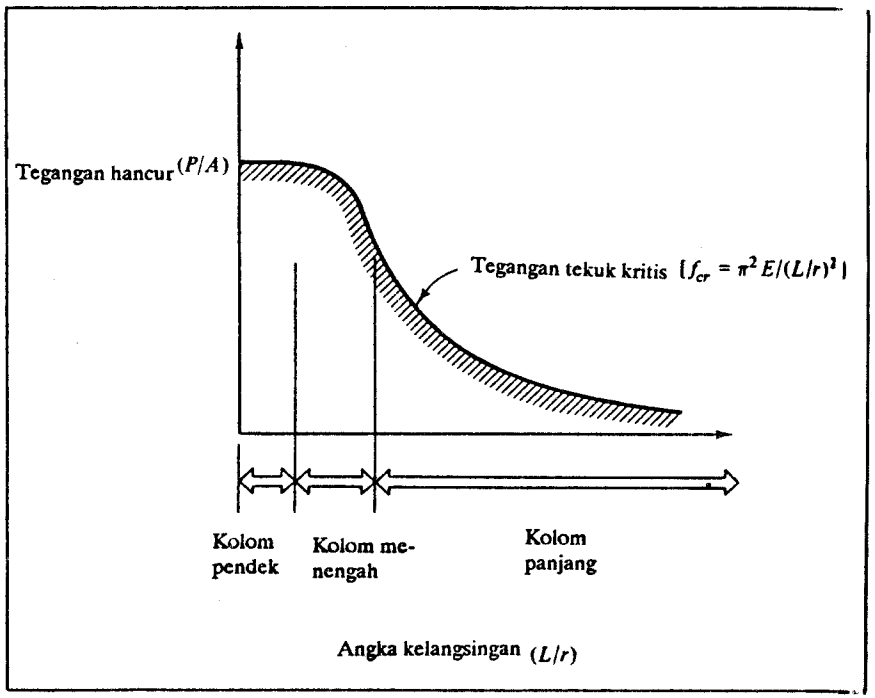
Suku L/r disebut *angka kelangsingan* kolom. Tegangan tekuk kritis berbanding terbalik dengan kuadrat angka kelangsingan. Semakin besar angka kelangsingan, akan semakin kecil tegangan kritis yang menyebabkan tekuk. Angka kelangsingan (L/r) ini merupakan parameter yang sangat penting dalam peninjauan kolom karena pada parameter inilah tekuk kolom bergantung.

Jari-jari girasi dapat diinterpretasikan sebagai berikut. Momen inersia penampang kolom sama dengan hasil kali luas penampang dengan kuadrat jari-jari girasi ($i = Ar^2$). Dengan demikian, jari-jari girasi suatu luas terhadap suatu sumbu adalah jarak suatu titik yang apabila luasnya dipandang terpusat pada titik itu, momen inersia terhadap sumbu akan sama dengan momen inersia luas terhadap sumbu itu. Semakin besar jari-jari girasi penampang, akan semakin besar pula tahanan penampang terhadap tekuk. Nilai jari-jari girasi untuk berbagai bentuk penampang banyak dicantumkan dalam bentuk tabel, sama halnya dengan nilai momen inersia.

Kekuatan Kolom Aktual versus Ideal. Apabila suatu kolom diuji secara eksperimental, akan ada perbedaan antara beban tekuk aktual dengan yang diperoleh secara teoretis. Hal ini khususnya terjadi pada kolom yang panjangnya di sekitar transisi antara kolom pendek dan kolom panjang. Hal ini terjadi karena adanya faktor-faktor seperti eksentrisitas tak terduga pada beban kolom, ketidaklurusan awal pada kolom, adanya tegangan awal pada kolom sebagai akibat proses pembuatannya, ketidakseragaman material, dan sebagainya. Kita ingat bahwa dalam ekspresi Euler, tegangan lentur tidak diperhitungkan. Karena itulah beban tekuk yang terjadi pada umumnya sedikit lebih rendah daripada yang diprediksi, khususnya pada daerah transisi antara

kolom pendek dan kolom panjang yang kegagalannya yang sering terjadi berupa sebagian elastis dan sebagian inelastis. Untuk memperhitungkan fenomena ini telah banyak dikembangkan ekspresi empiris maupun teoretis. Sebagai contoh, ada ekspresi yang lebih dekat memprediksi perilaku kolom pada *selang menengah (intermediate range)* (lihat Gambar 7–6). Penjelasan lengkap mengenai hal ini dapat dipelajari pada literatur lain.

Momen dan Beban Eksentris. Banyak kolom yang mengalami bukan saja gaya aksial melainkan juga momen (lihat Bab 9). Untuk kolom pendek, cara memperhitungkan adanya momen telah kita bahas pada Bab 7.3.1. Momen dinyatakan dalam $M = Pe$ dan kita dapat menghitung tegangan kombinasi antara tegangan aksial dan tegangan lentur. Untuk kolom panjang, ekspresi Euler belum memperhitungkan adanya momen. Sudah banyak ekspresi tekuk yang memperhitungkan lentur, tetapi hal ini tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini.

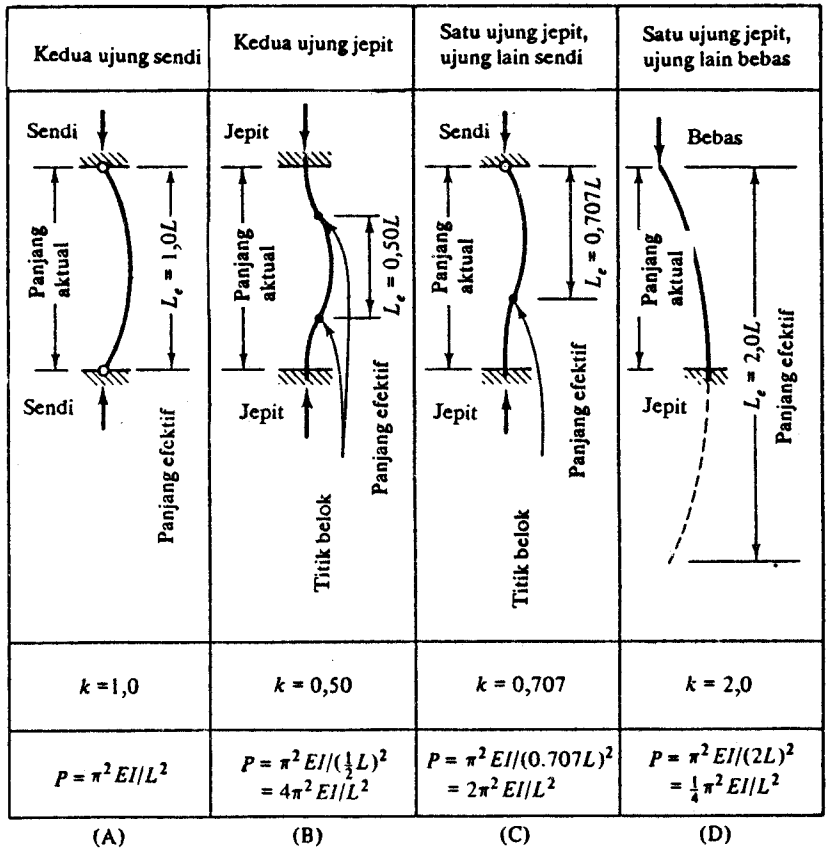


GAMBAR 7–6 Kolom ideal versus aktual.

Meskipun ada batasan-batasan yang telah disebutkan di atas, ekspresi Euler masih sangat berguna dalam mempelajari secara konseptual perilaku kolom.

Kondisi Ujung. Pembahasan sebelum ini dipusatkan pada kolom yang mempunyai ujung-ujung sendi, yang titik ujungnya bebas berotasi, tetapi tidak dapat bertranslasi.

Kondisi ini memungkinkan kolom itu berdeformasi seperti terlihat pada Gambar 7–7–(a). Tentu saja dapat terjadi kondisi ujung yang lain. Menahan kolom terhadap rotasi pada umumnya akan memperbesar kapasitas pikul-bebannya. Sebaliknya, kondisi ujung yang membolehkan terjadinya rotasi ataupun translasi pada umumnya akan menyebabkan berkurangnya kapasitas pikul-beban.



GAMBAR 7–7 Efek kondisi ujung terhadap beban tekuk kritis.

Di sini akan dibahas kapasitas pikul-beban empat kolom identik yang hanya berbeda pada kondisi ujung-ujungnya. Kondisi keempat kolom itu diilustrasikan pada Gambar 7–7, dan merupakan kondisi teoetis ekstrem karena dalam kenyataan, kondisi yang ada adalah kombinasi dari kondisi-kondisi tersebut. Kolom *A* adalah kolom standar berujung sendi yang telah kita bahas di atas. Kolom *B* mempunyai ujung-ujung jepit (tidak terjadi rotasi pada ujung). Kolom *C* mempunyai satu ujung jepit dan ujung lainnya sendi. Kolom *D* mempunyai satu ujung jepit dan ujung lainnya bebas berotasi maupun bertranslasi.

Beban tekuk teoretis untuk kolom-kolom itu masing-masing diperoleh dengan cara serupa dengan yang tercantum dalam lampiran 12 untuk kolom berujung sendi Perbedaannya hanyalah pada kondisi batas yang digunakan. Cara lain untuk memperoleh kapasitas pikul-beban itu ialah dengan meninjau efek kondisi ujung pada bentuk terdeformasi. Perhatikan bentuk terdeformasi kolom berujung jepit-jepit (kedua ujungnya jepit), yaitu kolom B pada Gambar 7–7(b). Bentuk kurva (digambarkan secara dibesarkan) itu digambarkan secara mudah dengan menggunakan kondisi bahwa garis singgung pada ujung jepit harus tetap berimpit dengan arah aksial kolom. Pada saat mengalami beban tekuk, kolom akan mempunyai kelengkungan. Agar kurva itu kontinu, harus berbentuk seperti terlihat pada gambar 7–7(b). Dari bentuk kurva itu jelas bahwa harus ada titik belok di mana tanda (arah) kelengkungan berubah. Lokasi titik belok ini dapat ditentukan secara eksak. Dalam hal ini lokasinya adalah $L_1/4$ dari setiap ujung di mana L_1 adalah panjang aktual kolom tersebut. Perhatikan bahwa bentuk kurva di antara kedua titik belok itu sama dengan bentuk kurva kolom berujung sendi-sendi. Hal ini tentu saja benar karena pada titik belok selalu dapat dipandang adanya titik hubung sendi. Dengan demikian bagian kolom di antara kedua titik belok itu dapat dipandang sebagai kolom ekuivalen yang panjangnya $L_1/2$ (yaitu jarak kedua titik belok tersebut) dan kedua ujung kolom ekuivalen ini adalah sendi. Panjang $L_1/2$ disebut *panjang efektif* untuk kolom jepit yang panjangnya L_1. Dengan demikian beban tekuk kolom jepit dapat ditentukan dengan menggunakan kolom yang ekuivalen itu, yaitu $P_B = \pi^2 EI/L_e^2$ di mana L_e adalah jarak antara kedua titik belok. Jadi, beban tekuk yang dimaksud adalah $P_B = \pi^2 EI/(L_1/2)^2 = 4\pi^2 EI/L_1^2$. Jelas bahwa efek penjepitan pada kedua ujung kalau dibandingkan dengan kolom sendi-sendi meningkatkan kapasitas pikul-beban menjadi empat kali lipat.

Proses yang sama dapat dilakukan pula untuk kondisi ujung lainnya. Bentuk terdeformasi disketsa dulu, kemudian titik belok ditentukan. Selanjutnya panjang efektif ditentukan, dan beban tekuk kritis dihitung dengan menggunakan $P = \pi^2 EI/L_e^2$. Dapat dibuktikan bahwa panjang efektif kolom yang satu ujungnya jepit dan ujung lainnya sendi adalah $L_e = 1/\sqrt{2}$ sehingga beban tekuk untuk kolom ini adalah $P_C = EI/(1/\sqrt{2}L_1)^2 = 2\pi^2 EI/L_1^2$ atau dua kali beban tekuk kritis kolom yang berujung sendi-sendi. Untuk kolom jepit bebas [lihat Gambar 7–7(d)], panjang efektifnya adalah $2L$. Dengan demikian $P_D = \pi^2 EI/2L_1)^2 = \frac{1}{4}\pi^2 EI/L_1^2$ atau seperempat dari beban tekuk pada kolom sendi-sendi.

Dari penjelasan di atas terlihat bahwa konsep panjang efektif sangat berguna dalam menganalisis kolom dengan berbagai kondisi ujung karena kita dapat melakukan prediksi kapasitas pikul-beban secara lebih ringkas. Nilai numerik yang menghubungkan panjang kolom sebenarnya dengan panjang efektifnya kita sebut faktor k kolom tersebut.

Adakalanya kolom mempunyai kondisi ujung pada satu sumbu yang tidak sama dengan kondisi ujung pada sumbu lainnya (misalnya bersifat sendi terhadap satu sumbu dan bersifat jepit pada sumbu lainnya). Dengan demikian kita harus hati-hati dalam memperhitungkan panjang efektif dan momen inersia atau jari-jari girasi. Jadi:

$$P_{cr_x} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_{e_x}^2} \quad \text{dan} \quad P_{cr_y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{e_y}^2}$$

$$f_{cr_x} = \frac{\pi^2 E}{(L_{e_x}/r_x)^2} \quad \text{dan} \quad f_{cr_y} = \frac{\pi^2 E}{(L_{e_y}/r_y)^2}$$

Seperti telah disebutkan, beban tekuk kritis untuk semua kolom ditentukan oleh yang terkecil di antara P_{cr_x} dan P_{cr_y}.

Efek ketidaksempurnaan kondisi ujung di dalam praktek sering kali secara kasar diperhitungkan dengan melakukan modifikasi pada panjang efektif kolom. Sebagai contoh, apabila suatu ujung kolom ditujukan untuk menjadi ujung jepit, sedangkan pada kenyataannya dalam praktek hanya dapat menahan sebagian rotasi, maka panjang efektif kolom adalah di antara $0{,}5L$ dan $1{,}0L$. Semakin besar tahanan rotasinya, akan semakin dekat dengan sifat jepit, jadi panjang efektifnya mendekati $0{,}5L$. Semakin kecil tahanan rotasi, nilai panjang efektif semakin mendekati $1{,}0L$. Nilai yang sering digunakan dalam praktek adalah $0{,}6L$ sampai $0{,}7L$.

Pada struktur rangka (frame), hanya sebagian tahanan rotasi yang dapat diperoleh dari titik hubung (lihat Bab 9). Sebagai akibatnya, panjang efektif kolom akan membesar. Apabila rotasi titik hubung disertai dengan translasi titik hubung, masalahnya menjadi sangat rumit.

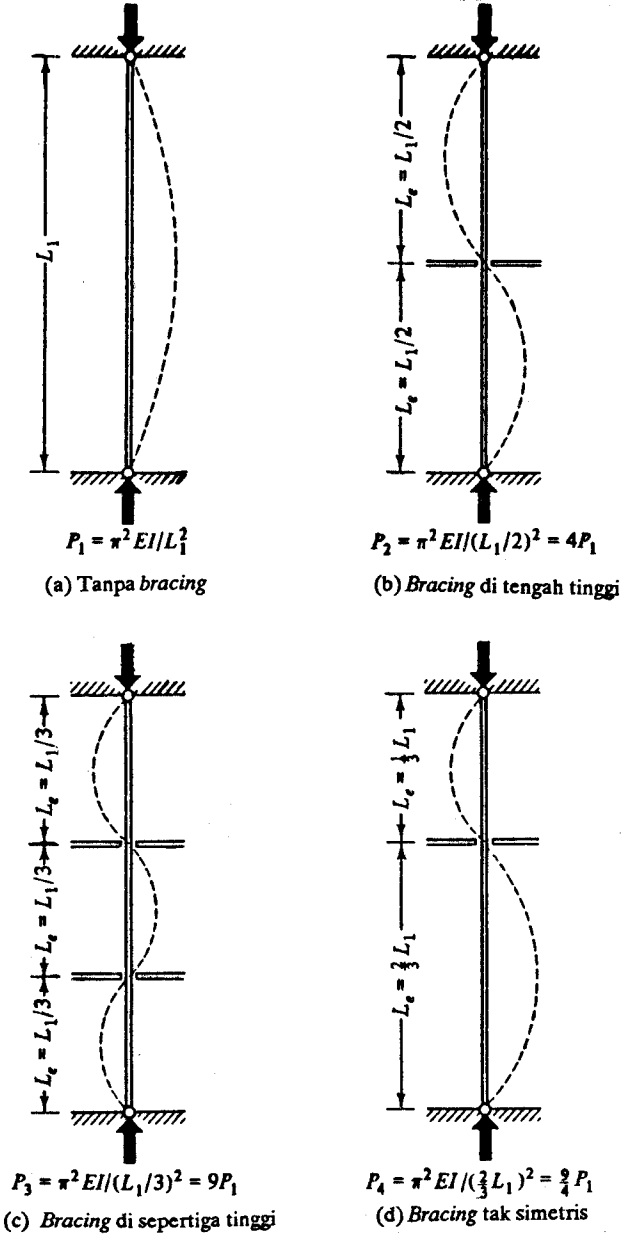
Bracing. Untuk mengurangi panjang kolom dan meningkatkan kapasitas pikul-beban, kolom sering dikekang pada satu atau lebih titik pada panjangnya (lihat Gambar 7–8). Pengekang (bracing) ini benar-benar dapat merupakan bagian dari rangka struktur pada suatu bangunan gedung dan mempunyai juga fungsi lain.

Gambar 7–8(b) mengilustraikan kolom berujung sendi yang diberi pengekang di tengah tingginya. Apabila kolom tersebut menekuk, akan terjadi deformasi berbentuk S seperti tergambar. Karena bentuk kolom di antara pengekang dengan titik belok analog dengan kolom ekuivalen yang berujung sendi, maka panjang efektif kolom semula sama dengan jarak ini. Jadi, panjang efektif kolom tersebut adalah setengah panjangnya, dan kapasitas pikul-bebannya adalah $P = \pi^2 EI/L_e^2 = \pi^2 EI/(L_1/2)^2 = 4\pi^2 EI/L_1^2$. Jelas bahwa untuk kolom berujung sendi yang diberi pengekang di tengah, kapasitas pikul-bebannya akan meningkat menjadi empat kali lipat daripada tanpa pengekang.

Apabila pengekang diletakkan pada titik yang jaraknya dua pertiga tinggi kolom dari ujung bawah kolom, maka kolom akan berdeformasi seperti tergambar. Jadi, panjang efektifnya adalah $\frac{2}{3}L$ atau $\frac{1}{3}L$. Jelas bahwa bagian tak terkekang yang lebih panjang akan terjadi sebelum bagian yang lebih pendek. Dengan demikian beban kritis untuk kolom ini adalah:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\frac{2}{3}L_1)^2} = (\tfrac{9}{4})\left(\frac{\pi^2 EI}{L_1^2}\right)$$

Jadi, mengekang kolom dengan cara ini tidak efektif dalam memperbesar kapasitas pikul-beban kolom dibandingkan dengan mengekangnya tepat di tengah tinggi kolom.



(a) Tanpa *bracing*

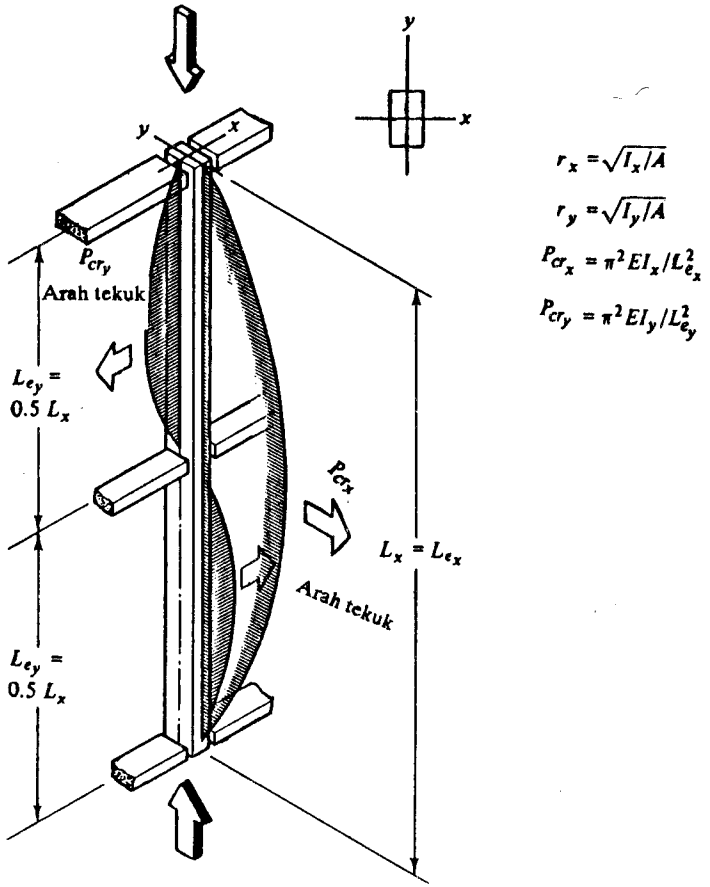
(b) *Bracing* di tengah tinggi

(c) *Bracing* di sepertiga tinggi

(d) *Bracing* tak simetris

GAMBAR 7–8 Efek pengekangan lateral terhadap tekuk kolom. Pengekangan kolom dapat mengubah ragam tekuk juga panjang efektif kolom tersebut. Semakin dikekang, panjang efektif kolom tersebut akan semakin pendek dan beban tekuk akan semakin bear.
Apabila pengekang *(bracing)* digunakan, akan lebih efektif apabila diletakkan secara simetrik.

Perhatikan bahwa suatu kolom dapat diberi pengekang terhadap satu sumbu saja, tidak terhadap sumbu lainnya. Kolom itu akan mempunyai kecenderungan menekuk dalam arah yang angka kelangsingannya semakin tinggi. Sebagai contoh, elemen struktur simetris yang terlihat pada Gambar 7–9 akan menekuk terhadap sumbu x (tak dikekang), bukan terhadap sumbu y yang panjang efektifnya $L_1/2$.



GAMBAR 7–9 Pengekang kolom hanya pada satu arah. Apabila kolom hanya dikekang pada satu arah, maka kolom tersebut mempunyai potensi untuk menekuk dengan dua ragam, akan tetapi ragam tekuk yang dapat terjadi adalah yang sehubungan dengan angka kelangsingan *(L/r)* lebih tinggi.

Desain kolom melibatkan banyak aspek. Salah satunya adalah penentuan ukuran penampang melintang kolom untuk suatu beban yang diketahui. Secara lebih umum, masalah desain juga melibatkan pengambilan keputusan mengenai jenis kondisi ujung yang akan dipakai, dan di mana letak pengekang apabila digunakan. Biasanya, penentuan ukuran kolom dilakukan hanya sesudah penentuan kondisi ujung dan pengekang dilakukan.

7.4.1. Tujuan Desain

Tujuan desain kolom secara umum adalah untuk memikul beban rencana dengan menggunakan seminimum mungkin material; atau alternatif lain, mencari desain yang memberikan kapasitas pikul-beban sebesar mungkin untuk sejumlah material yang ditentukan. Apabila fenomena tekuk masuk ke dalam desain, maka telah kita ketahui bahwa tidak seluruh kekuatan material dimanfaatkan.

Seperti telah disebutkan, faktor utama yang penting dalam kaitan dengan tekuk adalah *angka kelangsingan (L/r)* kolom. Angka kelangsingan kecil berarti bahwa kolom tersebut tidak ditentukan oleh tekuk. Angka kelangsingan tinggi biasanya tidak dikehendaki dalam desain. Penggunaan material paling efektif dapat diperoleh dengan meminimumkan tinggi kolom atau dengan mempertahankan nilai jari-jari girasi untuk sejumlah material yang diberikan. Salah satu atau kedua-duanya akan memperkecil angka kelangsingan elemen struktur tersebut, jadi memperbesar kapasitas pikul-bebannya. Kebanyakan proses desain kolom adalah di sekitar hal ini.

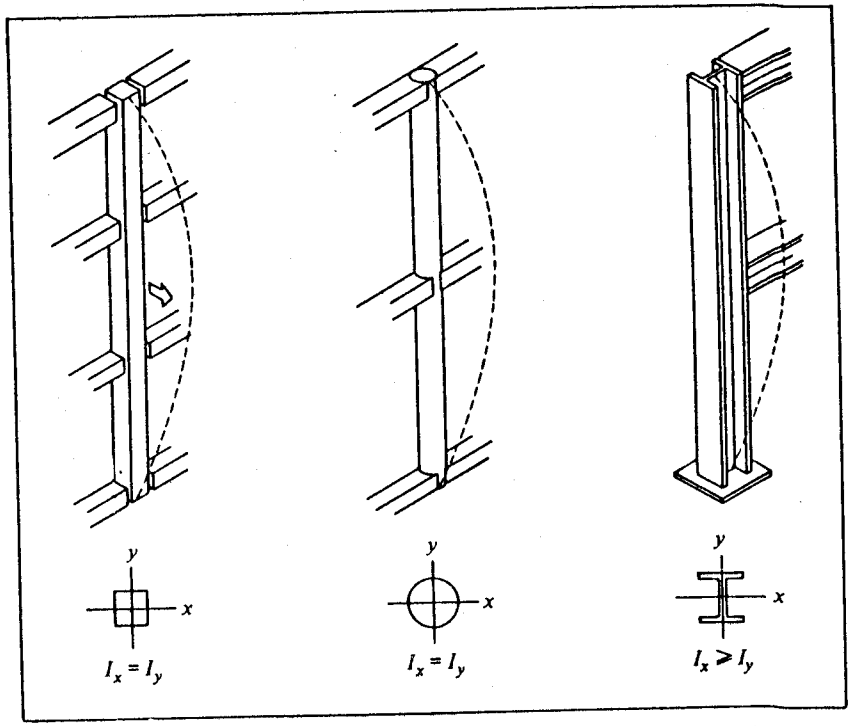
7.4.2 Kondisi Ujung

Pada Bab 7.3 telah ditunjukkan bahwa dengan memperbesar tahanan pada ujung kolom (yaitu dengan mengubahnya dari sendi menjadi jepit, misalnya), beban tekuk kritis akan sangat meningkat. Karena itulah apabila tujuan desain hanya untuk memikul beban, maka kolom yang dijepit akan memerlukan material jauh lebih sedikit dibandingkan dengan kolom berujung sendi. Dengan perkataan lain, pengurangan panjang efektif kolom (dengan menjepit ujungnya) dapat mengurangi penggunaan material. Kondisi ujung kolom jepit bebas seperti terlihat pada Gambar 7–7(d) tidak dikehendaki dibandingkan dengan kolom jepit-jepit [Gambar 7–7(b)] pada kedua ujungnya.

Akan tetapi, pilihan penggunaan ujung jepit harus disertai tinjauan lain. Tumpuan yang bersifat jepit lebih sulit dibuat dan lebih membutuhkan biaya dibandingkan dengan tumpuan sendi (hal ini khususnya pada material kayu). Apabila titik ujung ini terletak pada fondasi, maka jenis fondasi itu harus dapat menahan rotasi, bukan hanya mampu memikul gaya aksial. Untuk kolom yang relatif kecil, biasanya tidak diperlukan tambahan material, lain halnya bila kolomnya lebih besar dan bebannya bertambah. Dengan demikian, jelas bahwa dalam penentuan pilihan tumpuan sendi atau jepit, perlu ditinjau juga faktor lain yang terlibat sehingga diperoleh desain yang benar-benar efisien.

7.4.3 Pengekang (Bracing)

Salah satu di antara cara-cara yang dapat dilakukan oleh perencana dalam menambah efisiensi elemen tekan adalah dengan menggunakan *bracing* (pengekang). Adanya *bracing* memperkecil panjang efektif kolom. Akan tetapi, penambahan ini harus dilakukan hati-hati karena sering terjadi, apabila tidak dilakukan hati-hati, tidak ada keuntungan yang diperoleh meskipun *bracing* telah digunakan. Perhatikan kolom yang terlihat pada Gambar 7–10. Pada kasus ini penambahan *bracing* tidak memperbesar kapasitas pikul-beban kolom yang bersangkutan. Karena penampang melintang yang simetris ($Ix = Iy$), kolom akan menekuk dengan ragam yang tergambar, tidak dengan panjang yang terkekang. Hal ini disebabkan oleh tingginya angka kelangsingan pada arah yang tergambar. Sebagai akibatnya, beban tekuknya sama dengan yang akan terjadi apabila tidak ada pengekang sama sekali. Jelas bahwa apabila elemen struktur berpenampang simetris akan diberi pengekang, maka pengekang tersebut



GAMBAR 7–10 Penggunaan *bracing* secara tidak efektif. Kolom selalu menekuk pada ragam yang berkaitan dengan angka kelangsingan *(L/r)* terbesar. Kolom pada gambar ini menekuk seperti tergambar. Beban tekuknya sama saja dengan beban tekuk kolom yang tidak dikekang sama sekali. Pola *bracing* pada gambar ini tidak efektif dalam memperbesar kapasitas-pikul-beban kolom.

harus sedemikian rupa sehingga mengurangi angka kelangsingan dalam semua arah (dengan memberikan pengekang pada lebih dari satu bidang).

Jenis pengekang yang efisien dipeerlihatkan pada Gambar 7.11(a). Di sini elemen struktur simetris dikekang pada beberapa titik, pada semua arah. Banyaknya titik pengekangan dapat ditentukan dengan cara yang relatif mudah. Seperti telah dibahas terdahulu, untuk elemen struktur kolom yang mempunyai ukuran dan bentuk tertentu akan ada suatu panjang transisi tertentu antara kolom panjang dan kolom pendek. Dengan menggunakan sejumlah tertentu titik terkekang, kita dapat mengeliminasi kemungkinan tekuk pada elemen struktur. Dengan demikian elemen itu dapat didesain terhadap tegangan langsung saja (yaitu $A = P/F_{izin}$). Jadi, jumlah minimum *bracing* adalah yang memberikan panjang kolom sama dengan panjang transsisi antara kolom pendek dan kolom panjang. Pemberian *bracing* lebih banyak dari jumlah minimum ini tidak akan mengurangi kebutuhan luas penampang karena ukuran kolom sudah ditentukan oleh tegangan langsung, tidak lagi oleh panjang kolom.

Pada banyak situasi kita tidak dapat menggunakan *bracing* pada lebih dari satu lokasi. Sebagai contoh, kolom sering digunakan di dalam dinding yang dindingnya berfungsi pula sebagai pengekang lateral dalam satu bidang, tetapi kita biasanya tidak dapat menambahkan *bracing* karena mungkin saja digunakan sebagai ruangan fungsional. Dalam situasi demikian, kita dapat menggunakan penampang kolom tak simetris yang sumbu kuat kolomnya diletakkan sedemikian hingga dapat mencegah tekuk keluar dari bidang dinding. Kita dapat mengusahakan agar beban kritis tekuk terhadap satu sumbu tepat sama dengan beban kritis terhadap sumbu lainnya (yaitu $P_{cr_x} = P_{cr_y}$). Dengan demikian:

$$P_{cr_x} = P_{cr_y}$$

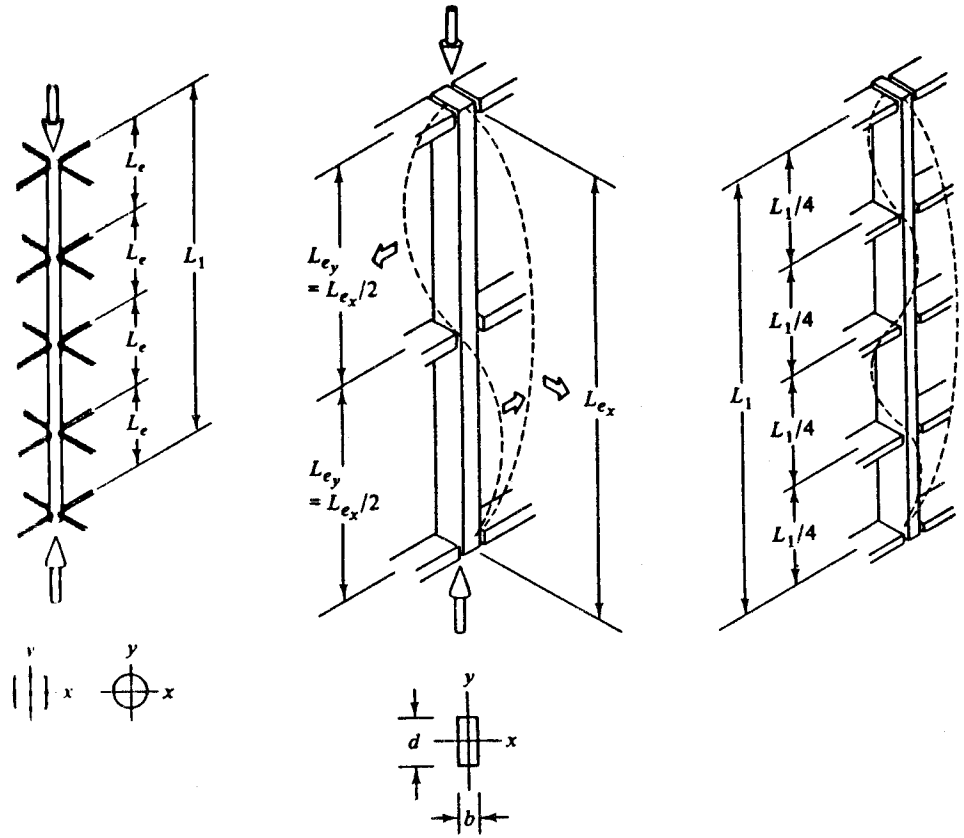
$$\frac{\pi^2 EI_x}{L_{e_x}^2} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{e_y}^2}$$

$$\frac{I_x}{I_y} = \frac{L_{e_x}^2}{L_{e_y}^2}$$

Apabila angka perbandingan yang melibatkan momen inersia dan panjang efektif di atas tepat sama, mungkin tekuk pada kedua arah akan sama. Kita dapat mengatur nilai momen inersia (I_x dan I_y), atau panjang efektif (L_{e_x} dan L_{e_y}), atau kedua-duanya untuk memenuhi kesamaan perbandingan tersebut.

Hubungan umum $I_x/I_y = L_{e_x}/L_{e_y}$ dapat juga digunakan untuk menentukan banyaknya titik kekangan (banyaknya *bracing*) untuk suatu nilai perbandingan I_x/I_y yang tertentu.

Sebagai alternatif dari perbandingan I_x/I_y, di dalam praktek kita dapat menggunakan perbandingan jari-jari girasi r_x/r_y. Konsep yang digunakan tetap sama, hanya saja yang digunakan adalah tegangan $f_{cr_x} = f_{cr_y}$ atau $\pi^2 E/(L_x/r_x)^2 = \pi^2 E/(L_{y/ry})^2$. Jadi $r_x/r_y = L_x/L_y$.



(a) Kapasitas pikul-beban kolom simetris dapat ditingkatkan semaksimum mungkin dengan menggunakan *bracing* yang cukup hingga panjang efektif kolom berkurang sampai cukup mendekati perilaku kolom pendek. Dengan demikian, kolom tersebut tidak mungkin mengalami tekuk.

(b) Apabila beban pada balok itu bertambah, balok akan mulai leleh pada penampang yang momen lenturnya besar (dalam hal ini pada ujung-ujung balok). Sendi plastis mulai terbentuk di titik- titik tersebut. Balok mulai berperilaku seperti balok di atas tumpuan sederhana, dengan tambahan momen ujung yang berupa momen tahanan. Penambahan beban akan menyebabkan terjadinya redistribusi momen (momen di tengah membesar). Meskipun sudah terbentuk sendi plastis pada dua titik, balok masih dapat memikul beban tambahan.

GAMBAR 7.11 Penggunaan *brancing* secara efisien.

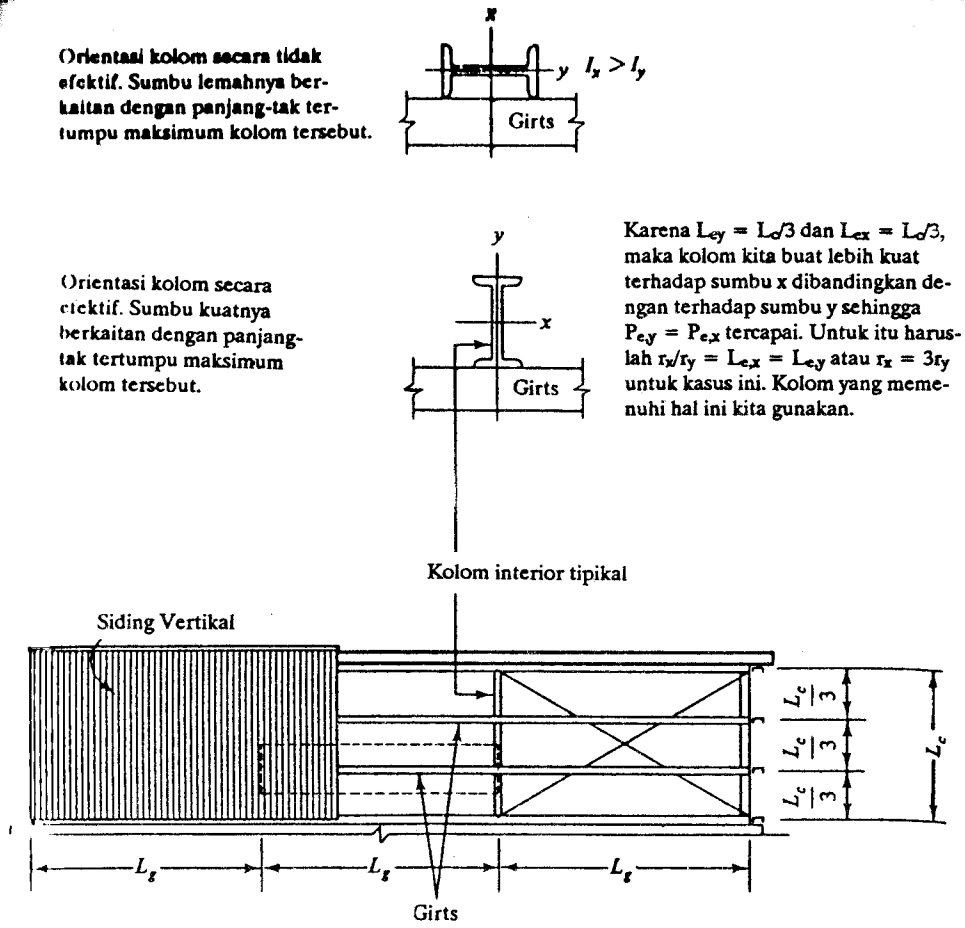
7.4.4 Kolom pada Konteks Gedung

Pembahasan sebelum ini dipusatkan pada masalah meningkatkan kapasitas pi beban kolom atau mengurangi ukuran yang diperlukan untuk memikul beban y diberikan dengan menggunakan *bracing*. Dalam pembahasan tersebut kita meng sikan bahwa tidak ada syarat dalam penggunaan *bracing* sebanyak yang diperlu Di lain pihak, titik-titik *bracing* itu harus didesain pula, yang pada gilirannya j memerlukan volume material. Apabila desain kolom dikaitkan dalam konteks ged tentu harus dilakukan optimisasi dalam peninjauan kolom beserta *bracing*-nya, bu hanya volume kolom yang ditinjau. Pada umumnya, yang lebih menguntung adalah penggunaan *bracing* pada titik-titik yang tidak terlalu banyak disertai kol yang agak besar dibandingkan dengan banyak *bracing* dan kolom kecil.

Pada Gambar 7-12 diilustrasikan kolom di dalam dinding pada gedung indus sederhana. Dinding itu dibuat dengan memasang *siding* vertikal pada elemen horizontal sehingga membentuk rangka dengan kolom. Kita dapat saja menggunakan lebih banyak elemen horizontal daripada yang tergambar. Penggunaan elemen horizontal lebih ba nyak mengandung arti bahwa bentang *siding*, yang berfungsi sebagai balok vertikal pemi kul gaya angin, berkurang (sehingga *siding* yang lebih ringan dapat digunakan). Dengan cara serupa, kolom akan dikekang pada lebih banyak titik pada satu bidang. Hal ini tentu mempengaruhi besaran-besaran kolom tersebut. Akan tetapi, apabila elemen horizontal yang digunakan terlalu banyak, hal ini akan menimbulkankesulitan dalam pelaksanaan. Penggunaan elemen horizontal akan memperkecil beban pada girts (jadi mengurangi ukurannya) dan mengurangi banyak titik *bracing* serta memper besar bentang *siding*, tetapi menyulitkan pelaksanaan. Pada umumnya, jarak antara elemen horizontal ditentukan berdasarkan bentang optimum untuk bentuk ekonomis *siding* yang tersedia. Pada gilirannya, hal ini akan menetapkan lokasi pengekangan kolom. Jadi, ukuran kolom ditentukan berdasarkan titik-titik pengekangan tersebut (yaitu perbandingan L_{e_x}/L_{e_y} diperoleh, dan dari sini kita peroleh perbandingan r_x/r_y). Kolom dengan nilai perbandingan r_x/r_y ini harus mampu memikul beban aksial yang diterimanya. Perlu diperhatikan bahwa tujuan contoh ini adalah untuk memperoleh sistem *siding* yang optimum, bukan kolom itu sendiri. Hal ini sering terjadi, tetapi tidak selalu harus demikian. Semakin besar beban pada kolom, dan semakin panjang kolom tersebut, akan semakin penting memperhatikan optimisasi kolom itu sendiri, bukan sistem *sidingnya*.

7.4.5 Penampang Melintang Kolom

Penentuan bentuk penampang melintang yang diperlukan untuk memikul beban, secara konseptual merupakan sesuatu yang mudah. Dalam banyak hal, tujuannya adalah untuk memperoleh penampang melintang yang memberikan nilai r_x dan r_y yang diperlukan dengan menggunakan material seminimum mungkin. Masalah ini sama saja dengan pada desainbalok yang tujuannya adalah memperoleh penampang yang memberikan momen inersia terbesar untuk sejumlah minimum material. Dalam desain kolom masalahnya menjadi lebih rumit karena kita harus meninjau jari-jari girasi terhadap lebih dari satu sumbu. Bagaimana pun, secara umum penampang



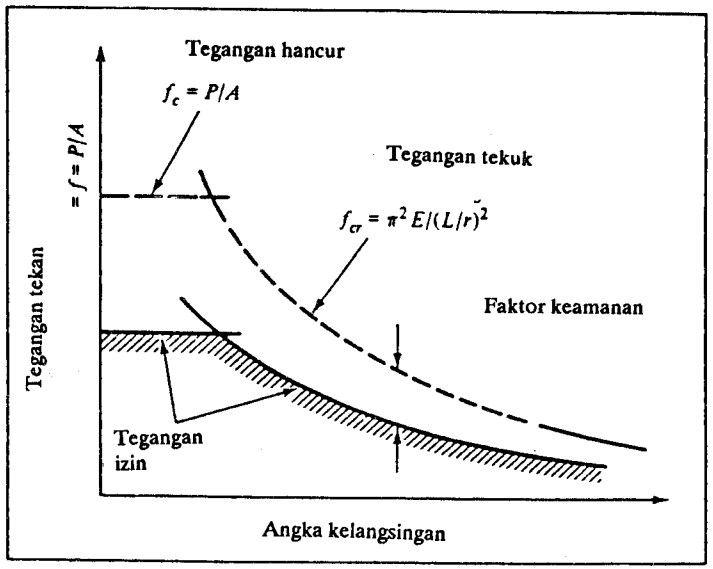
Girts horizontal mempunyai dua fungsi: (1) Menumpu siding vertikal yang mengalami beban angin. Dengan demikian girts berfungsi sebagai balok yang mempunyai bentang Lg. Siding sebagai balok yang mempunyai bentang $L_c/3$. (2) Untuk mengekang kolom pada satu bidang, jadi mengurangi panjang efektifnya terhadap sumbu y menjadi $L_c/3$. Panjang efektif terhadap sumbu x tetap sebesar L_c.

GAMBAR 7-12 Gedung kecil industri.

kolom yang efisien adalah yang sedapat mungkin memindahkan material lebih banyak ke bagian penampang yang jauh dari sumbu berat. Hal ini tentu akan memperbesar momen inersia I penampang untuk sejumlah material A tertentu. Dengan demikian, jari-jari girasi r akan bertambah mengingat $r = \sqrt{I/A}$. Dengan bertambahnya harga r, angka kelangsingan kolom, L/r, akan berkurang, jadi semakin jauh dari kemungkinan mengalami tekuk. Teknik demikian (mengoptimalkan momen inersia) telah dibahas pada Bab 6, dan masih relevan dalam desain kolom.

7.4.6 UKURAN KOLOM

Gambar 7-13 mengilustrasikan kurva tekuk kritis yang diturunkan dari ekspresi Euler. Dari sudut tinjauan desain, jelas bahwa suatu elemen struktur kolom harus mempunyai ukuran sedemikian rupa sehingga tegangan aksial aktual pada elemen akibat beban yang dialaminya (yaitu $f = P/A$) tidak pernah melampaui tegangan kritis yang ditentukan oleh tekuk atau tegangan yang ditentukan oleh kekuatan material (hancurnya material). Dengan menggunakan faktor keamanan, kita dapat memperoleh kurva baru yang merupakan tegangan izin kolom tersebut seperti terlihat pada Gambar 7-13. Kesulitan dalam menggunakan kurva demikian adalah untuk kolom panjang, tegangan yang diizinkan terjadi pada kolom, bergantung pada nilai L/r kolom itu sendiri. Apabila ukuran kolom belum ditentukan, nilai L/r (khususnya nilai r) juga belum diketahui. Sebagai akibatnya, tegangan izinnya juga belum diketahui. Karena itulah kita memerlukan proses interatif dalam menentukan ukuran kolom. Proses ini dimulai dengan menentukan dulu ukuran kolom coba-coba sehingga kita ketahui tegangan izinya. Kita hitung tegangan aktual pada kolom itu, dan kita bandingkan dengan tegangan izin. Apabila tegangan aktual lebih besar dari tegangan izin, ukuran coba-coba tersebut perlu diperbesar; apabila sudah lebih kecil (dan sudah cukup dekat dengan tegangan ijin), ukurannya sudah dapat digunakan. Tegangan aktual dihitung dengan $f = P/A$, sedangkan tegangan izin ditentukan dari kurva tegangan yang telah dimodifikasi (dengan memasukkan faktor keamanan) itu.



GAMBAR 7-13 Tegangan ijin tekan.

Seperti telah disebutkan terdahulu, faktor keamanan yang digunakan pada umumnya bergantung pada jenis material yang digunakan. Pembaca dapat mempelajari secara lebih rinci informasi mengenai desain kolom untuk berbagai material.[3]

3. W. Scofield, *Modern Timber Engineering*, ed. ke-3, Southern Pine Association, New Orleans, La., 1963; P.M. Ferguson, *Reinforced Concrete Fundamentals*, ed. ke-3, John Willey & Sons, Inc., New York, 1973; L. Beedle *etal.*, Structural Steel Design, *The Ronald Press Co., New York, 1964*

SOAL

7-1. Kolom baja bujursangkar berujung sendi-sendi dan tak dikekang (unbraced) mempunyai dimensi penampang melintang 1,5 in. x 1,5 in. dan panjang 10 ft. Berapakah beban tekuk kritis kolom ini? Anggap bahwa modulus elastisitas baja $E_s = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in.^{2}.

7-2. Kolom baja berujung sendi tak dikekang mempunyai dimensi penampang melintang 3 in. x 2 in. dan panjang 25 ft. Berapakah beban tekuk kritis kolom ini? Anggap bahwa $E = 29{,}6 \times 10^6$ lb/ft^2.
Jawaban: 2139 lb.

7-3. Kolom baja yang berpenampang lingkaran dan berujung sendi mempunyai diameter 20 mm dan panjang 5 m. Berapakah beban tekuk kritis kolom ini? Anggap bahwa $E_s = 204000$ N/mm^2.
Jawaban: 632,5 N.

7-4. Anggaplah suatu kolom yang panjangnya L dan berujung sendi mempunyai penampang bujursangkar $d_1 \times d_1$ dan mempunyai beban kritis tekuk P. Berapakah pertambahan relatif kapasitas pikul-bebannya apabila dimensi penampang melintangnya menjadi $2d_1 \times 2d_1$?

7-5. Kolom segiempat 1,5 in. x 2 in. dan tak dikekang serta berujung sendi dibebani beban aksial. Anggap bahwa $F_y = 36000$ lb/in^2 dan $E = 29{,}6 \times 10^6$ lb/in^2. Carilah titik transisi antara perilaku kolom pendek dan kolom panjang.

7-6. Bandingkanlah kapasitas pikul-beban antara kolom bujursangkar dan kolom lingkaran yang panjangnya, luas penampang melintangnya, dan kondisi ujungnya sama. Mana yang dapat memikul beban lebih besar? Berapakah perbandingan beban kritis antara keduanya? Jelaskan jawaban tersebut secara kualitatif.

7-7. Sebuah kolom yang ujungnya sendi dan panjangnya L dikekang (dengan *bracing*) pada satu sumbu pada titik-titik seperempat panjangnya. Tidak ada pengekang pada bumbu lainnya. Apabila suatu penampang segiempat berdimensi $b \times d$ digunakan, berapakah perbandingan b/d yang paling baik agar kapasitas pikul beban kolom tersebut maksimum? Anggap bahwa dimensi d adalah sehubungan dengan sumbu kuat penampang.

7-8. Dengan menggunakan *brancing* dan kondisi ujung yang sama dengan Soal 7-7, tentukanlah perbandingan I_x/I_y untuk kolom berpenampang sembarang. Tentukan juga perbandingan r_x/r_y yang sesuai untuk ini. Anggap bahwa I_x *serta* r_x adalah sehubungan dengan sumbu kuat penampang.

Bab 8

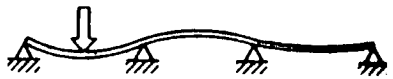
STRUKTUR MENERUS: BALOK

8-1 PENDAHULUAN

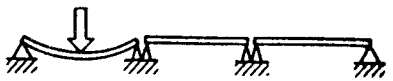
Bab ini membahas analisis dan desain balok yang menerus di atas banyak tumpuan serta balok statis tak tentu lainnya seperti terlihat pada Gambar 8-1. Secara matematis, struktur statis tak tentu adalah struktur yang reaksi, gaya geser, dan momen lenturnya tidak dapat ditentukan secara langsung dengan hanya menggunakan persamaan keseimbangan statika dasar $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma F_z = 0$. Pada umumnya pada struktur statis tak tentu, banyaknya anu (**unknowns**) lebih banyak daripada banyaknya persamaan solusi (dalam hal ini persamaan yang dimaksud adalah persamaan keseimbangan yang telah disebutkan di atas). Cara lain meninjau struktur statis tak tentu adalah dari tinjauan desain, yaitu besar reaksi, gaya geser, dan momen lentur *bergantung* pada karakteristik fisik penampang melintang, juga jenis material yang digunakan pada struktur tersebut, selain juga tentunya bergantung pada bentang dan beban yang bekerja. Kita ingat bahwa pada struktur statis tertentu, reaksi, gaya geser, serta momen lenturnya dapat dicari secara langsung dengan menerapkan persamaan keseimbangan statika, dan *tidak bergantung* pada bentuk penampang melintang serta material yang digunakan. Elemen struktur yang mempunyai lebih dari dua titik tumpuan, juga yang mempunyai lebih dari satu tumpuan jepit, adalah contoh struktur statis tak tentu.

Sebagaimana yang akan diuraikan berikut ini, struktur statis tak tentu sering kali memberikan keuntungan lebih dibandingkan dengan struktur statis tertentu, khususnya dalam hal memberikan kekakuan lebih besar dan berkurangnya momen yang timbul apabila dibebani. Dengan demikian, ukuran elemen struktur pada struktur statis tak tentu dapat lebih kecil.

(a) Balok menerus: beban di satu bentang dapat menyebabkan timbulnya momen dan kelengkungan pada bentang tersebut juga pada bentang-bentang lainnya. Oleh karena itu, semua bentang berperan dalam memikul beban. Ukuran balok dapat lebih kecil dari yang ada pada (b) karena pada (a) momen yang timbul lebih kecil, juga strukturnya lebih kaku.



(b) Balok sederhana: Beban pada satu bentang menyebabkan terjadinya momen lentur dan kelengkungan hanya pada bentang tersebut. Bentang lainnya tidak terpengaruh. Jadi, yang berperan memikul beban hanya bentang balok yang ada bebannya. Momen di bagian itu lebih besar daripada (a).



(c) Kelengkungan dan momen pada balok menerus mempunyai kecenderungan semakin kecil pada bentang-bentang yang jauh dari bentang balok yang dibebani.

GAMBAR 8-1 Balok sederhana versus balok menerus.

8.2 PRINSIP-PRINSIP UMUM

Pada Gambar 8-2 diperlihatkan dua jenis struktur statis tak tentu. Gambar pertama [Gambar 8-2(a)] adalah balok menerus (continuous beam) di tiga tumpuan sederhana. Gaya reaksi timbul pada setiap tumpuan. Jelas bahwa kita tidak dapat menghitung reaksi-reaksi (R_A, R_B, R_C) ini secara langsung hanya dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika ($\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M_0 = 0$) karena banyaknya reaksi (ada 3) lebih besar daripada banyaknya persamaan solusi (ada 2). Hal yang sama juga terjadi pada struktur balok berujung jepit yang terlihat pada Gambar 8-2(e). Dalam hal ini ada empat reaksi (R_A, R_B, M_A, dan M_B), sedangkan banyaknya persamaan keseimbangan statika hanya dua ($\Sigma F_y = 0$ dan $\Sigma M_0 = 0$). Karena itulah kedua jenis struktur ini termasuk kategori struktur statis tak tentu. Jelas bahwa solusi struktur demikian relatif lebih sulit dibandingkan dengan solusi struktur statis tertentu.

Meskipun analisisnya lebih sulit, balok statis tak tentu sering juga digunakan dalam praktek. Alasan utamanya adalah struktur ini pada umumnya lebih kaku untuk suatu kondisi bentang dan beban daripada struktur statis tertentu. Alasan lain adalah momen internal yang timbul pada struktur statis tak tentu akibat dibebani pada umumnya lebih kecil daripada yang timbul pada struktur statis tertentu. Dengan demikian ukurannya dapat lebih kecil. Kerugian struktur statis tak tentu adalah lebih pekanya terhadap *settlement* (penurunan) tumpuan dan efek termal. Sebagai contoh, turunnya tumpuan dapat menimbulkan momen lentur internal pada struktur statis tak tentu.

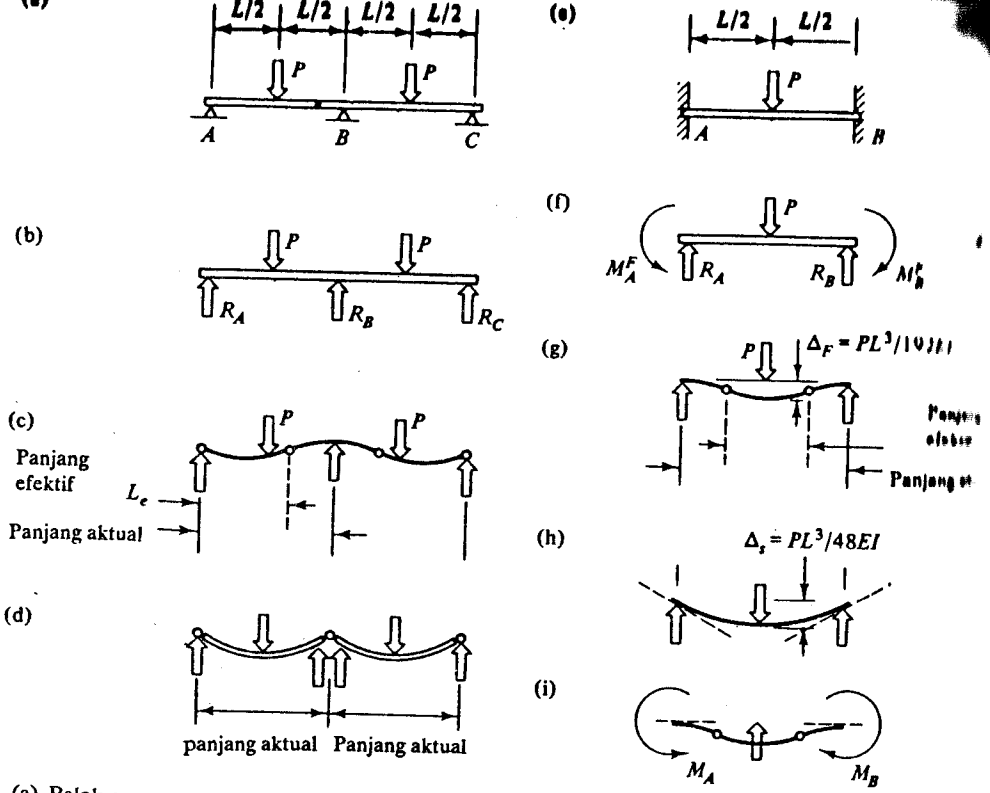
8.2.1 Kekakuan

Adanya peningkatan kekakuan pada struktur statis tak tentu dapat dipelajari dengan meninjau defleksinya. Dengan menggunakan cara yang dibahas pada lampiran B, misalnya, kita dapat menghitung defleksi di tengah bentang untuk balok di atas tumpuan sederhana yang memikul beban terpusat di tengah, yaitu sebesar $\Delta = PL^3/48\,EI$ [lihat Gambar 8-2(g)]. Apabila ujung-ujung balok tersebut adalah tumpuan jepit, maka lendutannya adalah $\Delta = PL^3/192EI$ [lihat Gambar 8-2(f)]. Dengan demikian jelas bahwa pengubahan tumpuan balok dari sendi menjadi jepit akan mengurangi lendutan menjadi seperempatnya. Kita perhatikan pada kurva defleksinya, bahwa pada balok yang ditumpu jepit terlihat adanya peningkatan kekakuan [lihat Gambar 8-2(h) dan 8-2(i)]. Perhatikan bahwa bentuk kurva defleksi balok terjepit dapat dengan mudah digambar dari bentuk kurva balok sederhana, kemudian diberi momen rotasional pada kedua ujungnya. Rotasi ini harus sedemikian hingga garis singgung pada ujung (pada tumpuan jepit) tetap berimpit dengan sumbu balok, yaitu horizontal. Rotasi ini saja menyebabkan balok melentur ke atas sehingga efek totalnya mengurangi lendutan. Besar momen pada ujung ini sedemikian rupa sehingga garis singgung balok tetap horizontal.

Observasi yang dapat dilakukan untuk meninjau adanya peningkatan kekakuan pada balok menerus di atas tumpuan sederhana dibandingkan dengan yang tidak menerus. Struktur menerus pada umumnya lebih kaku daripada yang ditumpu sederhana tak menerus. Dalam desain, balok menerus lebih disukai.

8.2.2 Distribusi Gaya

Alasan lain mengapa balok menerus dan balok jepit-jepit lebih sering digunakan daripada balok sederhana ialah gaya geser dan momen lentur yang timbul pada struktur statis tertentu. Sebagai contoh, pada balok jepit-jepit pada Gambar 8-2 (e) terlihat ada dua titik balok (di mana terjadi perubahan tanda kelengkungan balok) yang juga merupakan titik di mana momen lentur sama dengan nol. Dengan demikian, bagian balok di antara kedua titik belok ini dapat dipandang sebagai balok ditumpu sederhana. Jarak antara kedua titik ini disebut *panjang efektif* dari balok jepit-jepit. Besar momen lentur untuk segmen ini bergantung pada panjang segmen dan beban yang bekerja padanya. Apabila panjang efektif ini semakin pendek, momen lentur yang timbul juga semakin kecil; begitu pula sebaliknya. Pada balok di atas tumpuan sederhana, panjang efektifnya adalah panjang aktual balok tersebut. Pada balok berujung jepit, panjang efektifnya tentu saja lebih kecil dari panjang aktualnya. Dengan demikian momen lentur pada balok berujung jepit lebih kecil dibandingkan dengan pada balok di tumpu sederhana. Akan tetapi, kita harus ingat bahwa pada



(a) Balok menerus

(b) Balok ini statis tak tentu karena ada tiga reaksi tak diketahui dan hanya ada dua persamaan independen, yaitu $\Sigma F = 0$, dan $\Sigma M = 0$.

(c) Kurva defleksi balok tersebut. Ada dua titik belok (titik di mana kelengkungan berubah arah) Pada titik terjadinya momen sama dengan nol. Jarak antara titik belok disebut "panjang efektif balok, yang dapat dipakai sebagai pembanding dengan balok ditumpu sederhana. Panjang efektif yang semakin pendek berarti momen lentur semakin kecil. Dengan demikian momen pada balok menerus lebih kecil dibandingkan dengan balok ditumpu sederhana karena panjang efektifnya lebih kecil dari pada panjang aktual.

(d) Pada balok statis tertentu, panjang efektif balok sama dengan panjang aktualnya.

(e) Balok berujung jepit

(f) Balok ini statis tak tentu karena ada empat reaksi tak diketahui.

(g) Pada balok ini ada dua titik belok. [illegible] karena itu panjang efektifnya lebih [illegible] daripada panjang aktual. Dengan demikian momen yang timbul pada balok lebih [illegible] daripada yang timbul pada balok ditumpu sederhana. Balok bertumpuan jepit-jepit jauh lebih kaku dibandingkan dengan [illegible] ditumpu sederhana.

(h) Defleksi pada balok ditumpu sederhana lebih besar (empat kali) daripada balok jepit-jepit untuk kondisi beban ini.

(i) Bentuk defleksi balok ditumpu sederhana dapat diubah menjadi defleksi balok jepit-jepit dengan memberikan momen rotasi pada kedua ujung. Hal ini menjadikan lendutan di tengah bentang kecil. Besar momen rotasi yang diperlukan untuk memutar ujung-ujung agar garis singgungnya menjadi horizontal adalah reaksi momen pada balok jepit-jepit.

GAMBAR 8-2 Struktur statik tak tentu.

balok berujung jepit di ujungnya ada momen lentur, sedangkan pada balok di tumpu sederhana tidak ada. Jelas bahwa pemberian tumpuan jepit pada balok tidak hanya mengubah besar momen yang timbul pada struktur, tetapi juga distribusinya.

Dengan memahami panjang efektif, kita akan lebih mudah menganalisis struktur statis tak tentu. Setelah kita menggambar sketsa defleksi struktur, lokasi titik belok dapat ditentukan. Dengan demikian panjang efektif balok juga dapat ditentukan. Sebagai contoh, pada balok yang terlihat pada Gambar 8-2(c), lokasi titik-titik belok adalah seperti tergambar. Panjang efektif setiap bentang lebih kecil daripada bentang aktualnya. Dengan demikian momen pada bagian tengah setiap bentang akan lebih kecil daripada yang timbul pada balok ditumpu sederhana.

Cara meninjau struktur statis tak tentu jelas sama dengan cara memandang kolom seperti telah dibahas pada Bab 7. Akan tetapi, penting diingat bahwa lokasi titik-titik belok ditentukan oleh beban. Apalagi pada struktur Gambar 8-2(a) diberikan beban tekan, maka struktur tersebut tidak dapat mempunyai ragam tekuk seperti pada Gambar 8-2(c), tetapi akan berbentuk seperti S.

Berikut ini akan dibahas metode menentukan reaksi, gaya geser, dan momen lentur pada balok statis tak tentu. Metode ini didasarkan atas konsep yang dibahas di atas. Metode analisis yang lebih teliti dapat dipelajari pada lampiran 9, 10, dan 11. Berikut ini juga akan dibahas efek *settlement* tumpuan dan kondisi-kondisi pembebanan lainnya.

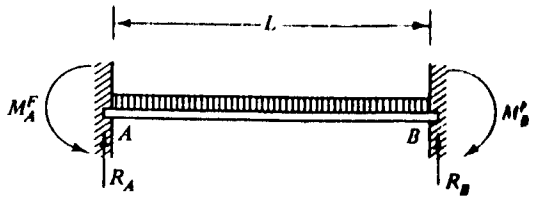
8.3 ANALISIS BALOK STATIS TAK TENTU

8.3.1 Metode Analisis Pendekatan

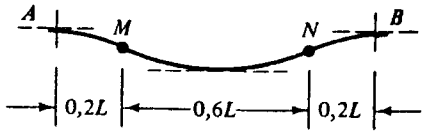
Pada Bab 8.3.1 ini dibahas metode untuk menentukan nilai pendekatan reaksi, gaya geser, dan momen lentur pada struktur statis tak tentu. Metode ini didasarkan atas konsep panjang efektif balok yang telah disebutkan di atas. Kita harus menggambar sketsa bentuk terdefleksi struktur, memperhatikan lokasi titik-titik belok kemudian mengurangi *anu* reaksi berdasarkan kondisi momen lentur di titik belok sama dengan nol. Ketelitian metode ini bergantung pada ketelitian sketsa kurva defleksi struktur.

Perhatikan balok berujung jepit yang terlihat pada Gambar 8-3(a). Dengan cermat kita gambarkan sketsa balok terdefleksi seperti terlihat pada gambar itu sehingga kita peroleh lokasi titik-titik belok. Karena momen lentur di titik belok kita ketahui selalu sama dengan nol, maka struktur tersebut dapat kita ubah menjadi struktur pada Gambar 8-3(c). Setiap bagian ini dapat dipandang sebagai balok statis tertentu di atas tumpuan sederhana. Reaksi pada balok tengah dapat ditentukan seperti terlihat pada gambar tersebut. Selanjutnya reaksi itu menjadi beban pada balok kantilever di kanan dan kirinya. Dengan demikian kita dapat menghitung reaksi dan menggambarkan diagram momen serta gaya geser untuk semua bagian. Diagram momen akhir untuk seluruh struktur adalah gabungan setiap diagram itu.

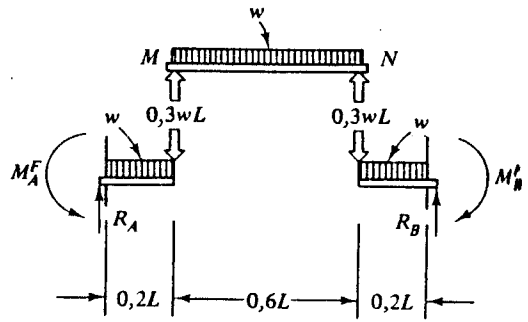
(a) Balok

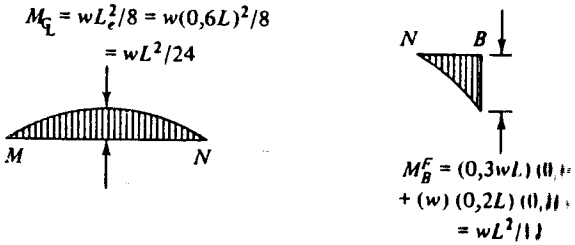


(b) Sketsa balok terdefleksi. Ada dua titik belok.

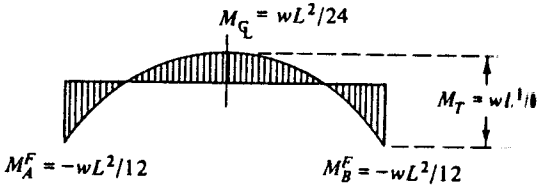


(c) Struktur itu diuraikan atas segmen-segmen statis tertentu yang terpisahkan pada titik belok. Momen untuk masing-masing bagian dapat dihitung.





(d) Diagram momen untuk seluruh struktur adalah gabungan dari masing-masing diagram momen segmen. Balok itu harus dirancang terhadap momen $wL2/12$ dan $wL2/24$.



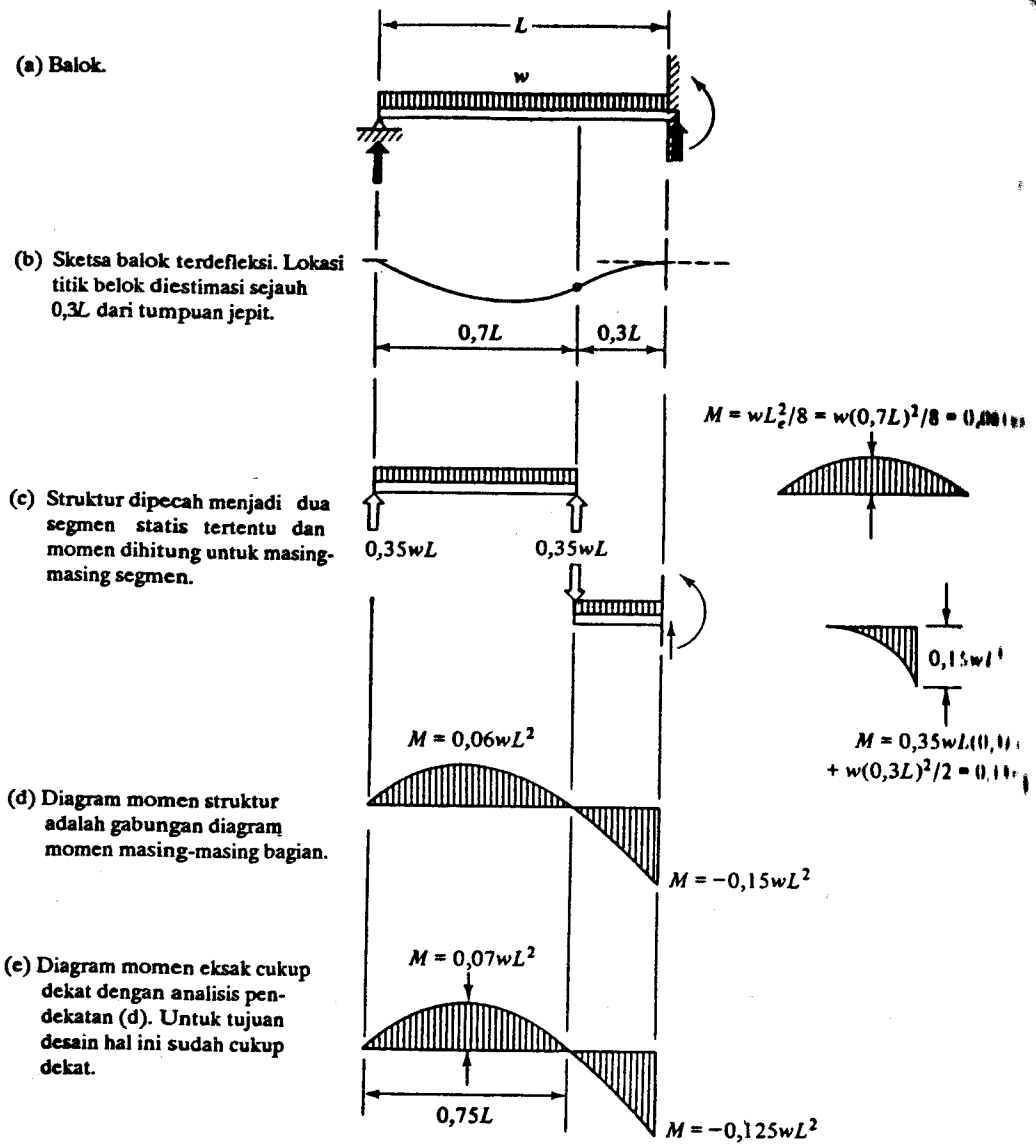
GAMBAR 8-3 Analisis pendekatan balok berujung jepit.

Momen maksimum yang timbul pada struktur adalah $M = wL^2/12$, bukan di tengah bentang, melainkan di ujung jepit. Momen di tengah bentang, $M = wl^2/24$, **hanyalah setengah dari momen pada tumpuan.** Struktur balok ini harus didesain **terhadap momen-momen tersebut.** Sebagai perbandingan, kita ingat bahwa pada **struktur balok sederhana, momen maksimum terjadi di tengah bentang sebesar** $M = wL^2/8$. Dengan demikian jelas bahwa perubahan struktur dari sederhana menjadi jepit sangat mengurangi momen lentur yang timbul. Karena berkurangnya momen, material yang dibutuhkan untuk desain balok itu juga sangat jauh berkurang. Hal yang menarik dari kasus ini adalah bahwa jumlah absolut momen maksimum di ujung ($wL^2/12$) dan di tengah bentang ($wL^2/24$) sama dengan momen maksimum pada balok sederhana untuk bentang dan beban yang sama, yaitu $wL^2/8$.

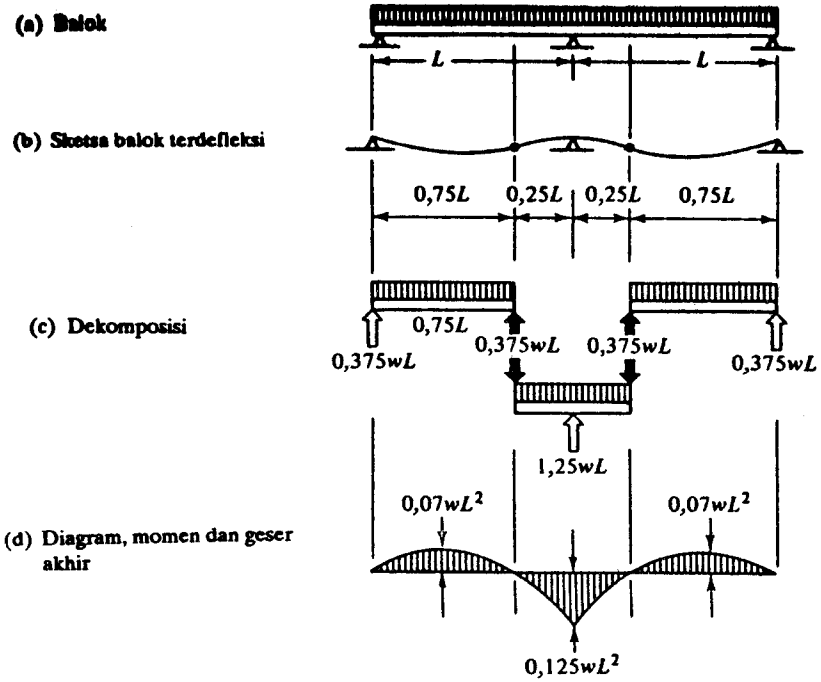
Gambar 8-4 mengilustrasikan analisis yang sama pada balok yang berujung sendi dan ujung lainnya jepit. Bentuk defleksi pendekatan disketsa sehingga lokasi titik belok dapat dietimasi. Selanjutnya struktur itu dibagi atas dua segmen. Pada setiap segmen dihitung reaksi, gaya geser, serta momen lenturnya. Dengan menggabungkan diagram-diagram momen itu kita peroleh diagram momen untuk seluruh struktur. Dalam hal ini titik belok diestimasi $0,3L$ dari ujung tumpuan kanan. Hal ini memberikan momen pada tumpuan jepit sebesar $-0,15wL^2$ yang ternyata nilainya cukup dekat dengan hasil eksak $-0,125wL^2$ (diperoleh apabila letak titik beloknya $0,25L$ dari ujung kanan). Dengan estimasi ternyata kita memperoleh nilai momen yang tidak begitu tepat, tetapi untuk tujuan desain, nilai ini sudah cukup mendekati nilai eksaknya.

Gambar 8-5 mengilustrasikan analisis balok menerus di atas tiga tumpuan. Dengan menggambarkan secara cermat kurva defleksi struktur untuk pembebanan tersebut kita akan dapat melihat adanya dua titik belok. Titik-titik ini mempunyai lokasi simetris sejauh $0,25L$ dari tumpuan tengah. Selanjutnya, untuk maksud analisis, struktur dapat dibagi atas segmen-segmen seperti terlihat pada Gambar 8-5(c). Setiap segmen dapat dipandang sebagai balok statis tertentu sehingga reaksi, gaya geser, dan momen lentur dapat dihitung. Diagram momen lentur dan gaya geser aktual untuk seluruh struktur dapat diperoleh dengan menggabungkan diagram tiap segmen. Reaksi maksimum pada balok menerus ini terjadi pada tumpuan tengah. Di atas tumpuan ini pula terjadi momen lentur maksimum.

Teknik menentukan bentuk sketsa struktur terdefleksi, menentukan titik belok, dan membagi struktur atas segmen-segmen dapat diterapkan pada balok yang terletak pada tumpuan bagaimana pun. Hal ini juga sangat berguna dalam mempelajari bagaimana menggambar secara kualitatif sketsa diagram momen pada struktur yang lebih kompleks lagi. Dari bentuk kurva defleksi, lokasi titik-titik belok dapat diestimasi. Selanjutnya diagram momen dapat digambar untuk suatu kondisi pembebanan tertentu (misalnya diagram momen berbentuk kurva lengkung untuk beban terditribusi merata atau berbentuk segmen-segmen linear untuk beban terpusat). Kendala bahwa diagram momen ini mempunyai nilai nol di titik belok juga perlu diperhatikan. Dengan banyak berlatih, kita akan terbiasa menggambar sketsa diagram momen untuk balok yang lebih rumit.



GAMBAR 8-4 Analisis pendekatan untuk balok yang mempunyai tumpuan sendi di satu ujung dan jepit di ujung lainnya.



GAMBAR 8-5 Analisis pendekatan pada balok menerus di atas tiga tumpuan.

8.3.2 Efek Variasi Kekakuan Balok

Pada awal Bab 8 ini telah disebutkan bahwa pada struktur statis tak tentu, reaksi, gaya geser, serta momen lentur tidak dapat ditentukan langsung dengan hanya menggunakan persamaan keseimbangan, tetapi bergantung pada geometri eksak penampang melintang yang digunakan, karakteristik material, dan variasi lainnya yang terjadi di seluruh bagian struktur. Analisis pada Bab 8.3.1 didasarkan atas asumsi bahwa E dan I tidak berubah di seluruh bagian struktur.

Untuk mempelajari efek perubahan nilai E dan I, kita tinjau dahulu dua kasus ekstrem balok berujung jepit-jepit dan jepit sendi yang telah kita analisis terdahulu. Pada Gambar 8-a6(a) kita dapat menganggap bahwa di ujung-ujung balok, baik E, atau I, maupun kedua-duanya sangat kecil atau mendekati nol. E, I, ataupun kedua-duanya merupakan ukuran kekakuan elemen struktur. Modulus elastisitas E merupakan ukuran kekakuan yang ditentukan oleh material yang digunakan. Semakin kecil harga E, semakin tidak kaku material itu (sebagai contoh, baja mempunyai nilai E sangat kecil). Momen inersia I merupakan ukuran banyaknya serta distribusi material yang digunakan. Semakin besar nilai I, semakin kaku penampang itu. Kekakuan menyeluruh elemen struktur pada suatu penampang melintang (yaitu kemampuan untuk menahan deformasi atau rotasi yang diakibatkan oleh beban

(a) Balok berujung jepit-jepit di mana E atau I pada kedua ujung mendekati nol

(b) Berkurangnya E atau I memperkecil kapasitas balok dalam menahan rotasi yang diakibatkan oleh beban. Oleh karena itu, titik belok terjadi pada lokasi tersebut (ujung), tidak seperti pada balok yang mempunyai E dan I konstan.

(c) Perubahan lokasi titik belok menyebabkan berubahnya diagram momen. Dalam hal ini, diagram momen hampir sama dengan diagram momen balok ditumpu sederhana, jadi momen maksimum yang terjadi adalah $wL^2/8$.

(d) Balok berujung jepit-jepit di mana E atau I mendekati nol di tengah balok.

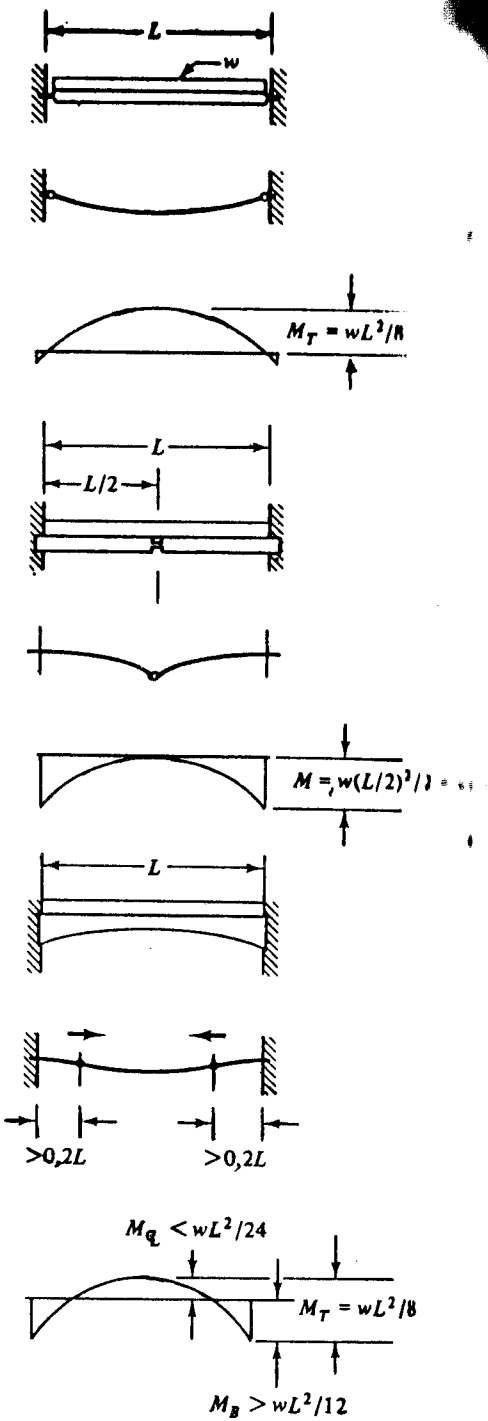
(e) Berkurangnya E atau I ditengah menyebabkan titik belok terjadi pada lokasi itu

(f) Balok tersebut berprilaku seperti dua balok kantiveler yang panjangnya L/2. Diagram momen total merefleksikan hal ini. Momen maksimum sebesar $wL^2/12$ juga terjadi.

(g) Balok jepit-jepit dengan penampang tak konstan (haunched) di mana semakin ke ujung, penampang semakin tinggi

(h) Karena bagian ujung lebih kaku daripada bagian tengah, maka titik belok cenderung bergerak ke tengah balok.

(i) Bergeraknya lokasi titik belok, mempengaruhi diagram momen. Dibandingkan dengan diagram momen balok berpenampang konstan, pada balok berpenampang tak konstan momen yang terjadi di tumpuan lebih besar, sedangkan dilapangan lebih kecil. Jadi dapat dikatakan bahwa momen lebih banyak dipikul oleh bagian struktur yang lebih kaku. Perhatikan bahwa jumlah momen positif dan negatif tetap $wL^2/8$. Jadi, momen total tidak berubah, yang berubah hanya distribusinya.



GAMBAR 8-6 Efek variasi kekakuan elemen struktur.

ekstornal) bergantung pada parameter-parameter itu. Apabila salah satu atau keduanya kecil pada suatu penampang, maka kekakuan elemen struktur pada penampang itu kecil.

Apabila seluruh bagian struktur dibebani, bagian balok yang mempunyai kekakuan lebih kecil akan mengalami rotasi internal lebih besar. Kapasitas menahan rotasinya kecil. Apabila E dan I mendekati nol pada suatu lokasi, maka struktur itu berperilaku (didasarkan atas bagaimana struktur tersebut berotasi) seperti titik sendi. Pada balok berujung jepit-jepit, bukan titik belok yang terjadi pada jarak $0{,}2L$ dari setiap ujung, seperti yang terjadi pada balok dengan E dan I konstan, melainkan ada pengurangan nilai E dan I secara drastis. Jadi, bentuk kurva defleksi struktur sangat dipengaruhi oleh hal ini. Dengan melakukan analisis seperti yang telah dilakukan untuk balok berpenampang tetap, diagram momen yang terlihat pada Gambar 8-6(c) dapat diperoleh (jelas bahwa diagram ini sama dengan diagram yang diperoleh pada balok ditumpu sederhana). Alternatif lain, perhatikan perilaku struktur apabila E dan I dianggap sangat kecil mendekati nol di tengah-tengah struktur. Sekali lagi, kita peroleh kapasitas struktur untuk menahan rotasi berkurang pada titik tersebut dan pada titik itu seolah-olah ada sendi. Kurva defleksi dan diagram momen untuk ini berturut-turut diperlihatkan pada Gambar 8-6(e) dan 8-6(f). Perhatikan bahwa momen total yang ada juga $wL^2/8$.

Setelah kita meninjau kasus-kasus ekstrem, kita tinjau sekarang perilaku struktur apabila ujung-ujungnya dibuat lebih kaku daripada bagian tengah balok (sering disebut *haunching* pada balok). Dalam menggambarkan kurva defleksi balok telah jelas bahwa adanya bagian yang semakin kaku pada bagian ujung ini menyebabkan balok dapat menahan rotasi pada likasi tepi itu. Dengan demikian efek yang diperoleh adalah titik belok pada balok berpenampang tak konstan lebih mendekati tengah balok dibandingkan dengan balok yang berpenampang konstan. Untuk saat ini analisis kita hanya sampai pada estimasi lokasinya. Dengan semakin ketengahnya lokasi titik belok, momen lentur yang ada pada ujung balok akan semakin besar, sedangkan di bagian tengah (di lapanagan) akan semakin kecil.

Contoh di atas mengilustrasikan alasan mengapa momen internal pada struktur statis tak tentu bergantung pada karakteristik penampang melintang dan variasinya di sepanjang struktur. Pada umumnya, efek pembesaran ukuran penampang pada suatu lokasi adalah memperbesar momen pada lokasi itu. Sebaliknya, pengurangan kapasitas elemen struktur di suatu bagian akan menyebabkan terjadinya reduksi momen lentur di bagian itu. Dengan demikian dapat kita katakan bahwa momen akan lebih banyak dipikul pada bagian struktur yang lebih kaku. Hal ini sangat penting diperhatikan dalam desain.

Pada semua variasi yang dibahas di atas, jumlah momen positif dan negatif untuk beban terditribusi merata selalu $wL^2/8$. Jadi, jelas bahwa efek variasi E dan I adalah mempengaruhi distribusi momen total pada balok, tetapi tidak mempengaruhi momen total yang diasosiasikan dengan balok ditumpu sederhana. Tentu saja perubahan distribusi ini menguntungkan karena momen desain elemen struktur itu adalah masing-masing momen positif dan negatif yang tentu saja lebih kecil dari $wL^2/8$.

8.3.3 Efek Settlement Tumpuan

Balok menerus atau balok berujung jepit-jepit adalah contoh struktur yang peka terhadap *settlements* (penurunan) tumpuan. Penurunan tumpuan dapat terjadi karena banyak hal, tetapi yang paling sering terjadi adalah karena adanya *konsolidasi tanah* di bawah tumpuan. Semakin besar beban yang diterima tanah, akan semakin besar kemungkinan terjadinya konsolidasi. Besar penurunan jarang sekali sama untuk semua tumpuan suatu struktur. Apabila memang sama, struktur turun bersama-sama tanpa adanya gaya-gaya internal pada struktur, yang artinya tidak menimbulkan tegangan apa pun pada struktur. Akan tetapi, yang umum terjadi tidaklah demikian. Tumpuan yang satu sering kali mengalami penurunan yang berbeda dengan tumpuan lainnya sehingga pada struktur statis tak tentu akan timbul gaya-gaya internal (gaya geser dan momen lentur).

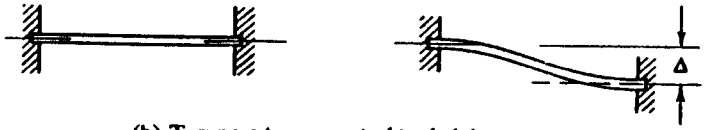
Perhatikan balok berujung jepit yang diperlihatkan pada Gambar 8–7. Balok ini tidak dibebani gaya eksternal apa pun, tetapi anggaplah terjadi perbedaan penurunan tumpuan sebesar Δ. Apabila salah satu tumpuan mempunyai perbedaan translasi vertikal terhadap tumpuan lainnya, tumpuan jepit akan mencegah terjadinya rotasi balok. Karena itulah pada balok terjadi kelengkungan. Bersamaan dengan kelengkungan itu tentunya ada momen lentur. Jelas bahwa apabila perbedaan penurunan semakin besar, maka momen lentur internal yang timbul juga akan semakin besar. Kejadian ini sangat berbeda dengan balok ditumpu sederhana. Pada balok ditumpu sederhana, apabila salah satu tumpuannya bertranslasi relatif terhadap tumpuan lainnya, baloknya akan dengan mudah mengikuti translasi itu tanpa terjadi kelengkungan maupun momen lentur internal. Karena itulah balok ditumpu sederhana lebih disukai daripada yang terjepit apabila yang diperhatikan hanyalah perbedaan turunnya tumpuan.

Settlements juga mempengaruhi balok menerus di atas banyak tumpuan. Perhatikan balok pada Gambar 8–7(c). Apabila perbedaan penurunan pada gambar itu terjadi, terjadi kelengkungan dan momen lentur pada balok. Apabila penurunan terjadi pada saat balok dibebani penuh, penurunan mengubah distribusi momen yang semula ada. Sebagai contoh, efek turunnya tumpuan tengah relatif terhadap tumpuan tepi menyebabkan semakin mendekatnya titik belok ke tumpuan tengah. Dengan demikian panjang efektif segmen balok itu menjadi semakin besar sehingga menyebabkan semakin besarnya momen positif pada struktur. Jelas bahwa apabila elemen struktur tidak dirancang secara cukup untuk memikul momen tambahan dapat terjadi kegagalan apabila terjadi penurunan tumpuan tengah.

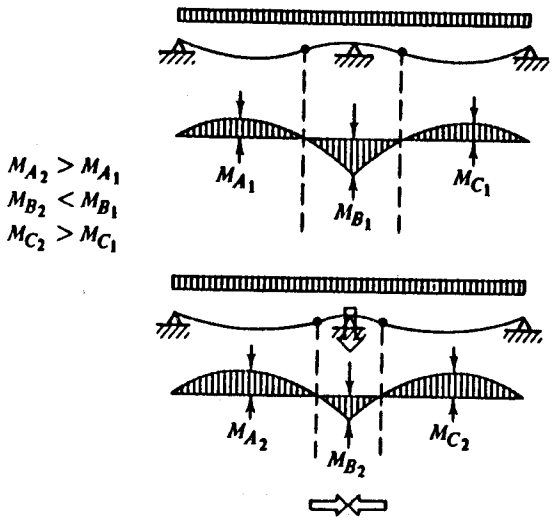
8.3.4 Efek Kondisi Pembebanan Sebagian

Salah satu dari aspek-aspek yang menarik pada struktur statis tak tentu yang dibebani adalah yang terlihat pada Gambar 8–8(a)–(c). Pada gambar itu diperlihatkan balok statis tak tentu di atas empat tumpuan yang memikul tiga kumpulan beban yang berbeda. Gambar 8–8(c) memperlihatkan struktur dalam kondisi pembebanan penuh di mana ketiga bentang struktur dibebani sama. Gambar 8–8(a) dan (b) mengilustrasikan dua kondisi pembebanan sebagian yang salah satu bentangnya tidak

(a) Turunnya tumpuan *(support settlements)* balok ditumpu sederhana tidak menimbulkan momen lentur pada struktur karena struktur dapat bebas berotasi.

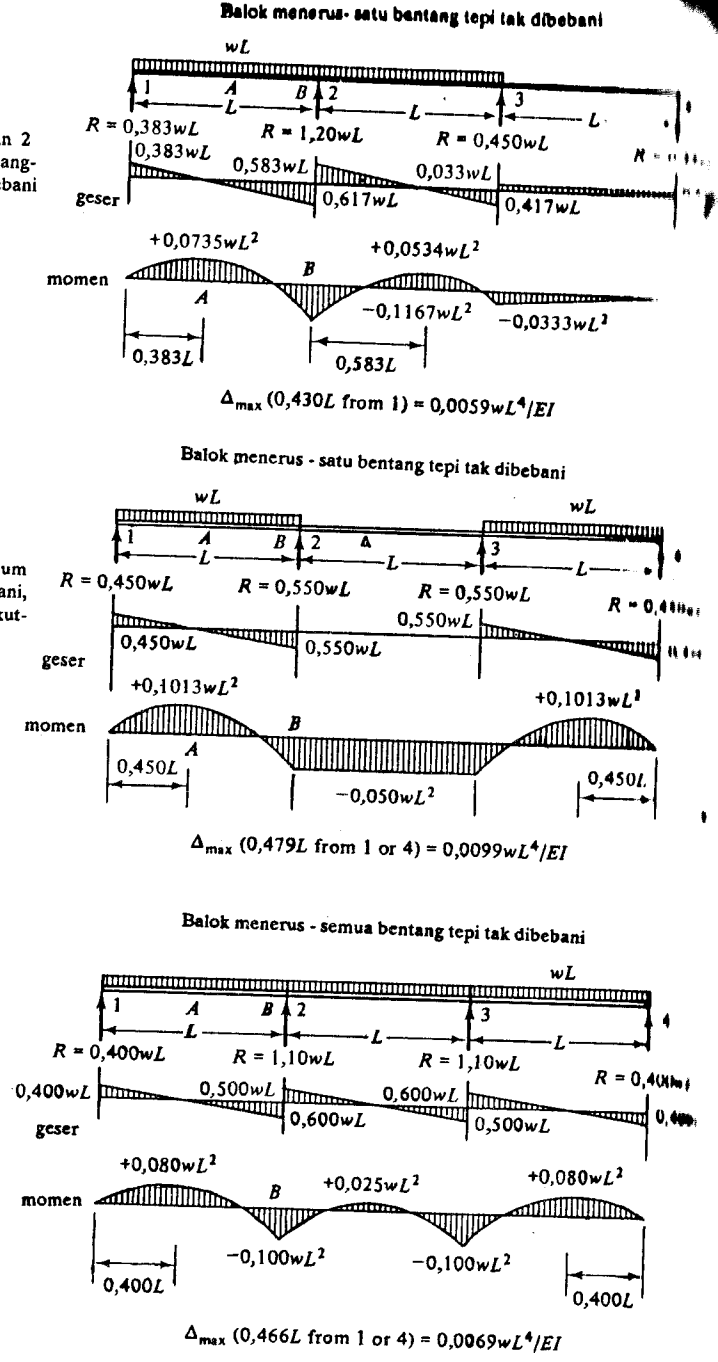


(b) Turunnya tumpuan struktur balok berujung jepit dapat menimbulkan momen lentur.



(c) Turunnya tumpuan balok menerus dapat menyebabkan bertambahnya momen lentur pada berbagai lokasi struktur. Turunnya tumpuan tengah menyebabkan titik belok bergerak ke tengah, jadi memperbesar momen positif. Reaksi pada ujung-ujung balok juga bertambah, sedangkan pada tumpuan berkurang.

GAMBAR 8–7. Efek turunnya tumpuan *(support settlements)*.



(a) Momen negatif di atas tumpuan 2 adalah maksimum apabila bentang-bentang kiri dan kanannya dibebani penuh.

(b) Momen positif di bentang tepi maksimum bila bentang yang bersangkutan dibebani, juga bentang yang berselang satu berikutnya.

(c) Kondisi beban penuh. Momen positif dan negatif tidak mencapai nilai maksimum untuk kondisi beban ini.

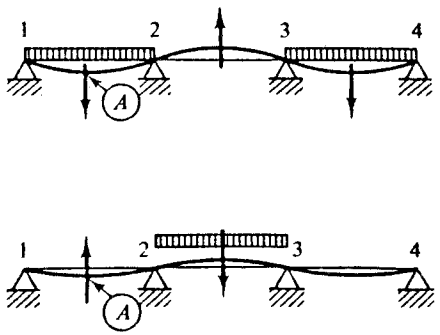
GAMBAR 8–8 Efek kondisi pembebanan sebagian.

dibebani sama sekali. Kondisi yang berbeda ini menunjukkan pola beban yang mungkin terjadi dari waktu ke waktu. Pada gambar-gambar itu juga diperlihatkan momen yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan metode yang dibahas pada lampiran 10.

Apabila kita meninjau berbagai lokasi pada struktur (yaitu A dan B), setiap kondisi pembebanan memberikan momen lentur yang berbeda pada setiap lokasi. Menarik untuk mempelajari momen pada ketiga kondisi pembebanan pada gambar itu. Momen positif maksimum di A bukanlah terjadi pada saat semua bagian struktur dibebani penuh, melainkan pada kondisi beban sebagian [lihat Gambar 8–8(b)]. Begitu pula momen negatif maksimum pada B bukan diperoleh pada kondisi semua bagian struktur dibebani, melainkan pada kondisi beban sebagian pula [lihat Gambar 8–8(a)]. Jadi, kondisi beban penuh ternyata tidak memberikan nilai maksimum untuk momen negatif maupun positif. Momen desain kritis selalu diberikan oleh kondisi beban sebagian. Perlu diperhatikan bahwa tidak ada kondisi beban sebagian yang secara simultan memberikan momen maksimum kritis pada semua lokasi.

Tentu saja, apa yang terjadi pada situasi yang dijelaskan di atas adalah bahwa kelengkungan balok, jadi juga momen lentur yang timbul, pada suatu lokasi ditentukan oleh lokasi beban pada struktur. Sebagai contoh, untuk titik A jelas bahwa beban pada bentang 1–2 akan menyebabkan momen lentur dan kelengkungan positif. Apabila bentang 3–4 juga dibebani, efeknya memperbesar kelengkungan, juga momen positif pada A. Dengan demikian momen kritis pada A lebih besar daripada yang diperoleh apabila hanya bentang pertama yang dibebani [lihat Gambar 8–9(a)]. Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa beban pada bentang tengah menyebabkan bentang kiri melengkung ke atas. Efeknya mengurangi momen lentur dan kelengkungan positif pada titik A. Dengan demikian kondisi pembebanan ini menyebabkan terjadinya momen yang sama dengan kondisi pembebanan sebagian yang telah ditinjau sebelumnya.

Pembebanan yang menghasilkan momen maksimum seperti dijelaskan di atas disebut *kondisi pembebanan kritis*. Ada beberapa cara formal untuk memperoleh kondisi pembebanan yang kritis pada suatu struktur. Sayang sekali, hal ini tidak termasuk ke dalam ruang lingkup buku ini.



(a) Beban pada bentang 1-2 dan 3-4 memperbesar kelengkungan pada A. Membesarnya kelengkungan berarti momen pada lokasi itu bertambah. Dengan demikian beban pada 1-2 dan 3-4 mempunyai kontribusi memperbesar momen positif pada A.

(b) Beban pada bentang 2-3 menyebabkan berkurangnya kelengkungan positif pada A sehingga mengurangi momen positifnya. Jadi, agar momen pada A meksimum, bentang itu tidak dibebani

GAMBAR 8–9 Kondisi pembebanan pada balok menerus.

8.4.1 Pendahuluan

Proses desain balok menerus sama saja dengan proses desain balok sederhana. Apabila momen maksimum yang dapat terjadi pada struktur telah diketahui, proses selanjutnya adalah menentukan penampang struktur yang cukup untuk memikul momen itu. Proses melakukan hal ini identik dengan yang telah dibahas pada Bab 6.4 untuk balok sederhana. Semua cara menentukan ukuran penampang telah dibahas pada bab itu dan dapat diterapkan untuk balok menerus. Prinsip mengenai distribusi material secara optimal di suatu penampang melintang juga dapat diterapkan pada balok menerus. Karena itulah pada Bab 8.4 ini kita hanya menambahkan hal-hal yang khusus mengenai desain balok menerus.

8.4.2 Momen Desain

Hal penting dalam desain balok menerus adalah kita harus mengasumsikan terlebih dulu ukuran maupun material penampang sebelum memperoleh momen desain. Jadi, pembahasan pada Bab 8.3.6 relevan diterapkan di sini. Telah diuraikan terdahulu bahwa momen maksimum yang dapat timbul pada suatu penampang struktur jarang, atau bahkan tidak dapat, terjadi apabila struktur dibebani penuh, tetapi terjadi apabila struktur dibebani sebagian. Akan tetapi, perlu diingat bahwa kondisi momen positif maksimum maupun momen negatif maksimum terjadi pada saat beban penuh pada bentang yang bersangkutan. Jadi, yang menjadi masalah adalah apakah beban-beban pada bentang lainnya mempunyai kontribusi dalam memberikan nilai maksimum atau sebaliknya. Karena itulah dalam desain, kita perlu meninjau semua kemungkinan posisi beban yang mungkin terjadi pada struktur, untuk kemudian kita hitung momen yang terjadi. Tentu saja ada kondisi pembebanan yang memberikan momen maksimum, ada yang tidak. Ukuran penampang struktur ditentukan berdasarkan momen maksimum yang mungkin terjadi padanya akibat suatu kondisi pembebanan tertentu. Untuk penampang lain, kondisi pembebanan yang memberikan momen maksimum dapat saja berlainan. Sering terjadi, untuk kepraktisan desain, momen maksimum pada satu penampang dipakai juga sebagai momen desain pada penampang lain yang momen maksimumnya sebenarnya lebih kecil. Oleh karena itu, sering terjadi pula, pada suatu kondisi pembebanan tertentu ada bagian struktur yang kelebihan ukuran (oversized), sementara pada kondisi pembebanan lainnya tidak.

Pada situasi yang rumit, penentuan momen desain untuk banyak titik kritis pada struktur adalah pekerjaan yang relatif kompleks. Untuk situasi yang umum dijumpai telah ada tabel yang mencantumkan momen desain. Untuk struktur dua atau lebih bentang yang panjang tiap bentangnya kurang lebih sama (bentang yang berdekatan tidak mempunyai beda lebih dari 20%) dan memikul beban terdistribusi merata (beban hidupnya tidak lebih dari tiga kali beban mati), gaya geser dan momen lenturnya untuk maksud desain adalah yang tercantum pada Tabel 8–1. Pada kondisi yang tidak biasa harus dilakukan analisis lain yang lebih teliti.

Pembahasan berikut ini tidak meninjau lebih lanjut efek pembebanan sebagian. Kita akan memusatkan bahasan pada penentuan ukuran dan bentuk penampang sebagai repons terhadap kondisi pembebanan desain. Sering kali efek pembebanan sebagian pada struktur yang dipakai pada gedung diperhitungkan sesudah ukuran struktur didesain terhadap pembebanan utama.

Tabel 8–1. Momen Desain

Momen positif	
Bentang ujung	
Apabila ujung diskontinu tak dijepit	$\frac{1}{11} wL^2$
Apabila ujung diskontinu integral dengan tumpuan	$\frac{1}{14} wL^2$
Bentang interior	$\frac{1}{16} wL^2$
Momen negatif pada tumpuan interior pertama	
Dua bentang	$\frac{1}{9} wL^2$
Lebih dari dua bentang	$\frac{1}{11} wL^2$
Momen negatif pada tumpuan-tumpuan interior lainnya	$\frac{1}{11} wL^2$
Momen negatif pada semua tumpuan untuk	
(a) *slab* yang bentangnya tidak melebihi 10 ft,	
(b) balok dan *girder* di mana perbandingan antara jumlah kekakuan kolom terhadap jumlah kekakuan balok lebih besar dari delapan di setiap ujung bentang	$\frac{1}{12} wL^2$
Momen negatif pada tumpuan eksterior untuk elemen struktur yang integral dengan tumpuan-tumpuannya.	
Apabila tumpuannya merupakan *girder* atau balok *spandrel* (tepi)	$\frac{1}{24} wL^2$
Apabila tumpuannya berupa kolom	$\frac{1}{16} wL^2$
Geser pada balok ujung pada tumpuan interior pertama	$1{,}15\frac{wL}{2}$
Geser pada semua tumpuan lain	$\frac{wL}{2}$

8.4.3 Penentuan Penampang Balok Menerus

Telah jelas bahwa penentuan ukuran suatu penampang melintang balok menerus bergantung pada besar momen yang ada pada penampang tersebut. Kenyataannya ada berbagai variasi distribusi momen pada struktur itu. Tentu saja suatu struktur dapat didesain terhadap momen maksimum absolut yang ada pada struktur, dan ukuran itu digunakan untuk bagian lain struktur tersebut. Hal ini pada umumnya dilakukan untuk alasan kemudahan pelaksanaan.

Alternatif lain, ukuran struktur dapat dibuat bervariasi di seluruh bagian struktur sesuai dengan momen yang secara aktual timbul pada setiap bagian. Cara melakukan hal ini telah kita bahas dalam masalah balok sederhana (lihat Bab 6.4.5). Pada desain jembatan jalan raya, penentuan ukuran elemen struktur sering kali didasarkan sedapat mungkin atas penghematan material, bukan kemudahan pelaksanaan.

Pada umumnya penentuan penampang balok di sepanjang bentangnya merupakan hal yang relatif mudah kecuali untuk satu hal. Perhatikan struktur balok menerus seperti terlihat pada Gambar 8–10. Apabila balok itu mempunyai tinggi yang telah benar-benar didesain berdasarkan momen yang terjadi pada setiap titik yang bersangkutan, bentuk strukturnya akan seperti yang terlihat pada Gambar 8–10(d). Jelas bahwa di mana ada titik belok, tinggi penampang dapat mendekati nol (apabila gaya geser kita abaikan). Secara aktual hal ini tentu saja tidak masuk akal. Struktur ini hanya stabil untuk beban pada gambar itu, dan tidak stabil untuk kondisi beban lainnya. Sedikit saja penyimpangan beban sudah dapat menyebabkan tejadinya keruntuhan. Alternatif yang dapat dilakukan adalah melakukan desain struktur yang merefleksikan momen positif maksimum dan momen negatif maksimum, sekaligus mengabaikan titik belok. Apabila hal ini dilakukan, dan kita memperhatikan adanya gaya geser, maka struktur yang diperoleh akan seperti terlihat pada Gambar 8–19(e). Konfigurasi ini sering digunakan, terutama pada jembatan baja jalan raya.

Meskipun adanya efek beban-sebagian telah ditinjau, bentuk pada Gambar 8–10(e) masih cukup layak kecuali apabila perbandingan beban hidup / beban mati sangat besar.

Bentuk *eksak* suatu elemen struktur yang bervariasi dari titik dengan momen positif maksimum ke momen negatif maksimum bergantung pada pilihan struktur yang digunakan. Bentuk optimum eksak untuk struktur rangka batang untuk suatu variasi momen sangat berbeda dengan bentuk optimum untuk balok segiempat *solid* (lihat Bab 4 dan 6). Penampang balok lainnya (misal bentuk *sayap lebar*) akan memberikan variasi lain terhadap momen. Karena itulah sketsa variasi tinggi penampang terhadap momen yang diperlihatkan pada Gambar 8–10 hanyalah sketsa diagramatis.

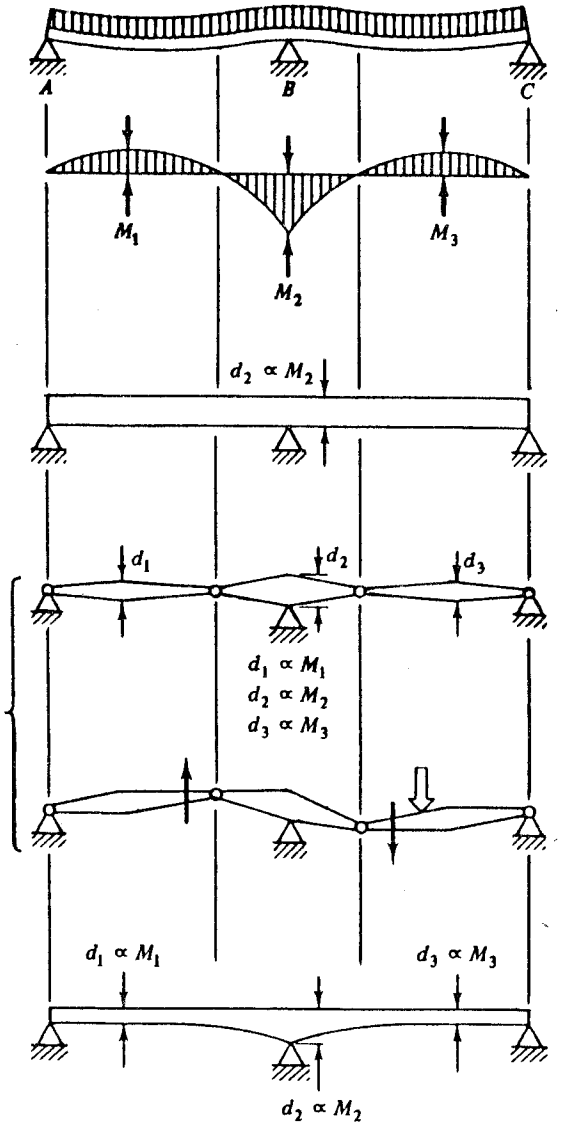
(a) Pembebanan

(b) Diagram momen $M_2 > (M_1, M_3)$

(c) Balok yang tingginya konstan. Tinggi balok, d_2, menunjukkan momen maksimum yang ada. Di bagian lain, struktur tersebut kelebihan ukuran.

(d) Tinggi struktur pada setiap titik menunjukkan momen yang timbul pada titik yang bersangkutan. Secara teoretis struktur itu stabil untuk kondisi beban tersebut, tetapi tidak stabil untuk kondisi beban lain.

(e) Dengan memberi ukuran yang disesuaikan dengan momen hanya pada bagian tertentu, struktur yang diperoleh akan dapat stabil untuk berbagai kondisi pembebanan.



GAMBAR 8–10 Berbagai alternatif desain balok menerus.

8.4.4 Penggunaan Titik Konstruksi

Karena alasan pelaksanaan, kita sering mengalami kesulitan dalam membuat elemen struktur menerus yang panjang, karena itu kita sering menggunakan *titik pelaksanaan (construction joints)*. Gambar 8–11 mengilustrasikan penggunaan titik pelaksanaan (titik konstruksi) pada balok yang menerus di atas tiga tumpuan, tetapi dilaksanakan atas beberapa bagian. Untuk memudahkan pembuatan titik konstruksi itu, titik-titik tersebut diletakkan di dekat, atau pada, titik belok. Dengan demikian titik pelaksanaan tidak perlu dirancang untuk memikul momen, jadi hanya merupakan titik hubung sendi. Jenis titik hubung demikian akan lebih mudah didesain dibandingkan dengan titik yang kaku yang harus memikul momen lentur.

Pada Gambar 8–11 ada empat titik belok. Akan tetapi, titik hubung sendi tidak dapat diletakkan pada semua titik belok karena hal ini dapat menyebabkan struktur tidak stabil untuk kondisi pembebanan lain. Hal ini tentu saja merupakan kendala yang sama dengan yang dihadapi pada waktu menentukan variasi ukuran penampang di sepanjang balok menerus. Titik hubung sendi hanya dapat digunakan apabila konstruksi struktur yang dihasilkannnya stabil. Untuk balok yang diilustrasikan pada Gambar 8–11(a)ada dua cara dasar untuk melakukan hal ini. Yang pertama adalah meletakkan titik konstruksi pada bentang-bentang tepinya sehingga bentang tengah mempunyai bagian meminggul (kantilever). Pelaksanaan struktur itu dimulai dengan bentang yang tengah, kemudian ditambahkan dua bagian tepi lainnya. Alternatif lain, titik pelaksanaan digunakan pada bentang tengah sehingga ada dua balok stabil yang mempunyai bagian meminggul. Dengan demikian, struktur itu harus dilaksanakan mulai dengan meletakkan dua bagian tepi, kemudian ditambah dengan bagian tengah. Pada kedua cara ini, struktur yang diperoleh adalah statis tertentu, yang berfungsi bersama untuk *merefleksikan* perilaku balok menerus.

Keuntungan penggunaan titik hubung sendi akan diperoleh apabila perilaku balok menerus dapat secara eksak direfleksikan. Titik hubung sendi adalah yang paling efektif digunakan apabila pembebanan desain, dalam hal beban terdistribusi penuh pada struktur, adalah beban utama yang diharapkan terjadi. Apabila kondisi pembebanan menyimpang dari beban desain utama, pada struktur masih ada kestabilan, hanya saja perilakunya sekarang adalah struktur statis tertentu, dan *tidak* merefleksikan perilaku balok menerus, yang berarti tidak memberikan keuntungan. Karena alasan itulah titik hubung kaku sering digunakan.

Metode umum yang diilustrasikan pada Gambar 8–11(e) sering kali diikuti dengan penentuan ukuran penampang yang merupakan respons terhadap momen maksimum positif dan negatif [Gambar 8–10(f)]. Banyak struktur jembatan besar yang menggunakan metode ini. Pada struktur yang dirancang dengan cara demikian, pada umumnya beban mati jauh lebih dominan dibandingkan dengan beban hidup.

8.4.5 Pengontrolan Distribusi Momen

Momen yang timbul pada balok menerus dan balok berujung jepit-jepit dapat dikontrol dengan cermat oleh perencana. Hal ini dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satunya adalah dengan mengatur bentang dan beban pada struktur.

(a) Pembebanan

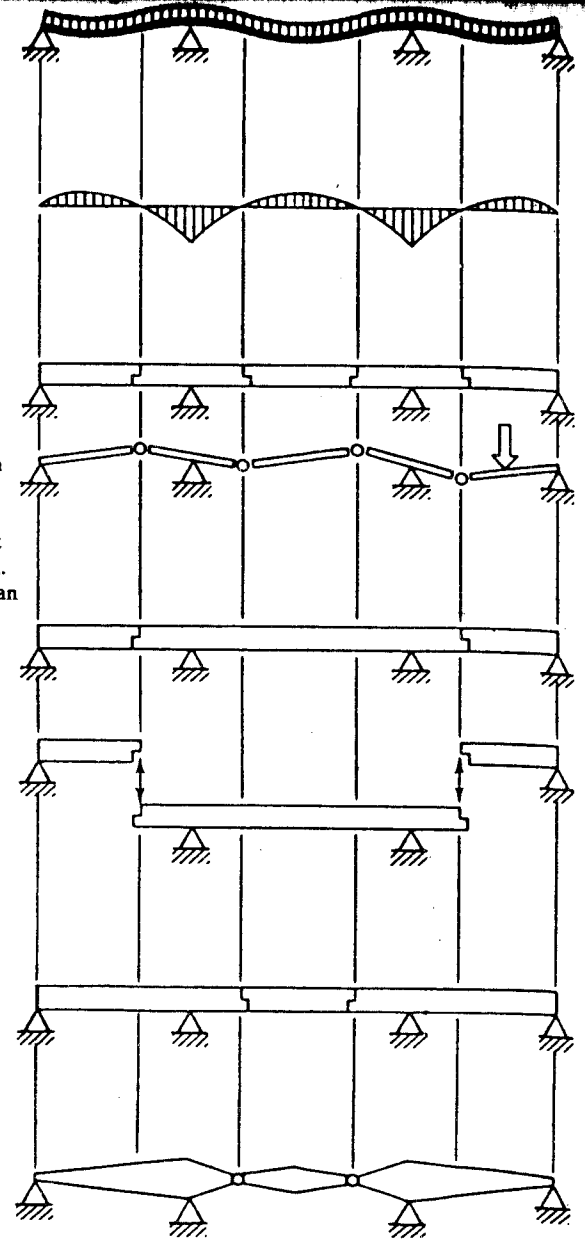
(b) Diagram momen

(c) Penggunaan *construction joints* (pada umumnya berupa hubungan sendi) pada setiap titik belok. Struktur yang diperoleh akan tidak stabil untuk kondisi beban lain, misalnya beban tidak penuh. *Titik konstruksi* kaku yang dapat memikul momen dapat digunakan untuk memperoleh kestabilan. Alternatif lain adalah dengan menggunakan pilihan di bawah ini.

(d) Penggunaan *titik konstruksi* hanya pada bentang tepi. Konfigurasi ini stabil untuk sembarang kondisi pembebanan. Pada saat konstruksi, bentang tengah diletakkan sebelum bentang- bentang lainnya.

(e) Penggunaan titik konstruksi pada bentang tengah. Struktur yang diperoleh stabil untuk sembarang kondisi pembebanan. Bentang tepi diletakkan terlebih dahulu, baru kemudian bentang tengah.

(f) Penggunaan titik konstruksi pada bentang tengah diikuti dengan pemberian bentuk struktur yang merefleksikan momen yang ada



GAMBAR 8–11 Penggunaan titik konstruksi pada balok menerus. Titik konstruksi ini dibuat untuk memudahkan pelaksanaan. Dengan menggunakan kondisi momen nol di titik belok, perilaku balok menerus tersebut dapat dimodelkan sebagai struktur statik tertentu.

Tanpa harus menggunakan bentang-bentang yang panjangnya sama, kita tetap d... mengatur distribusi momen. Seperti telah disebutkan pada Bab 6 4, penggunaan kantilever pada ujung-ujung balok sering kali dilakukan, khususnya untuk mengurangi momen positif dan defleksi pada bentang ujung.

Cara lain mengontrol distribusi momen adalah dengan menggunakan titik konstruksi. Penggunaan titik konstruksi ini pada titik belok telah dibahas pada bab 8.4.4. Tentu saja titik hubung sendi tidak dapat diletakkan di mana saja. Kita harus meletakkan hubungan sendi itu secara hati-hati agar kita benar-benar dapat mengurangi momen desain.

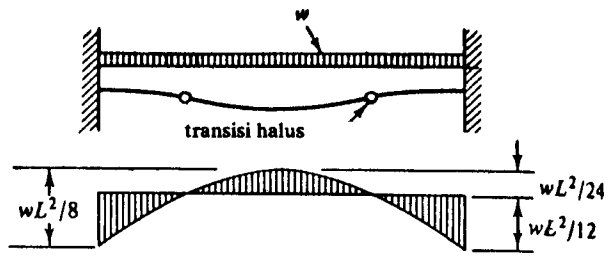
Perhatikan balok jepit-jepit yang telah dianalisis terdahulu dan diperlihatkan kembali pada Gambar 8–12. Momen yang timbul pada ujung-ujung jepit adalah $wL^2/12$, dan di tengah bentang adalah $wL^2/24$. Titik belok terjadi pada penampang sejauh 0,21 L dari setiap ujung. Kita dapat saja mengurangi momen desain dari wL^2 12, yaitu dengan menggunakan titik-titik yang lebih dekat ke ujung balok di bandingkan dengan titik belok. Hal ini akan memperbesar bentang efektif (jadi memperbesar momen positif), tetapi mengurangi momen negatif pada tumpuan. Dengan cara demikian kita dapat mengusahakan agar momen positif sama dengan nilai absolut momen negatif, yaitu dengan meletakkan titik hubung sendi pada penampang sejauh 0,15L. Sebagaimana biasanya, momen total maksimum positif dan negatif adalah $wL^2/8$. Jadi, apabila kita menghendaki momen positif sama dengan momen negatif, kedua-duanya mempunyai nilai absolut $wL^2/16$. Jelas bahwa momen desain ini jauh lebih kecil daripada semula $(wL^2/12)$ sehingga ukuran penampang dapat lebih kecil.

Penggunaan titik hubung sendi pada titik yang bukan titik belok mempunyai konsekuensi lain. Salah satunya adalah kita tidak memperoleh lagi kurva halus di antara daerah momen positif dan momen negatif yang umum terjadi pada titik belok maupun apabila titik hubung sendi diletakkan pada titik belok. Pada titik hubung sendi yang bukan pada titik belok terjadi diskontinuitas rotasi antara bagian kantilever dengan bagian tengah struktur. Apabila diskontinuitas ini cukup besar dapat menimbulkan masalah pada balok itu, khususnya apabila digunakan dalam konteks gedung. Sebagai contoh, apabila di atas balok itu kita gunakan penutup atap, maka diskontinuitas dapat menyebabkan penutup atap itu retak. Hal ini tidak akan terjadi apabila kurvanya halus (smooth).

Contoh lain meletakkan lokasi sendi untuk mengontrol momen diilustrasikan pada Gambar 8–12(c). Dengan meletakkan titik sendi secara cermat, momen positif dan negatif maksimum dapat diusahakan sama (atau hampir sama), jadi meminimumkan momen desain maksimum yang ada. Sekali lagi, diskontinuitas kelengkungan terjadi pada lokasi sendi apabila lokasi ini tidak sama dengan lokasi titik belok.

8.4.6 Balok Menerus Beton Bertulang

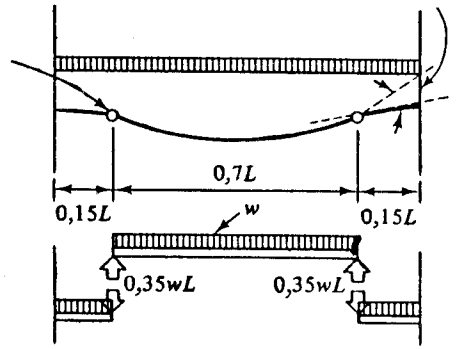
Beton bertulang merupakan salah satu contoh material yang cocok untuk digunakan pada balok menerus. Kontinuitas dapat diperoleh dengan mengatur penulangan balok beton bertulang itu.



(a) Balok berujung jepit-jepit. Bentuk balok terdefleksi serta bidang momen digambarkan.

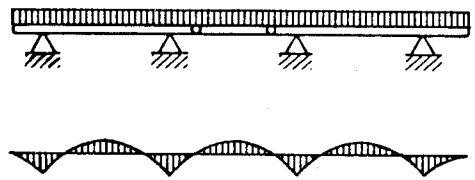
Diskontinuitas sudut sudut garis singgung pada ujung bagian tengah tidak sama dengan pada ujung kantilever.

Titik Konstruksi (sendi)



(b) Dengan mengunakan hubungan sendi (pada titik yang diketahui mempunyai momen sebesar nol), momen maksimum dapat berkurang dari $wL^2/12$ menjadi $wL^2/16$. Jadi, ada penghematan material.

(c) Apabila hubungan sendi tidak diberikan pada titik belok, maka akan dapat terjadi diskontinuitas defleksi. Hal ini tidak dikehendaki.



(d) Momen pada struktur menerus di atas banyak tumpuan dapat juga dikontrol dengan meletakkan hubungan sendi. Sekali lagi, pada hubungan sendi ini terjadi diskontinuitas. Dengan mengatur panjang bentang, lokasi hubungan sendi, serta bagian meminggul, kita dapat memperoleh momen maksimum positif sama dengan negatif.

GAMBAR 8–12 Pengontrolan distribusi momen dengan mengatur lokasi titik konstruksi (titik hubung sendi).

Gambar 8–13 mengilustrasikan pola penulangan untuk balok menerus dua bentang. Tentu saja tulangan baja diletakkan pada daerah di mana terjadi tegangan tarik. Banyaknya tulangan pada setiap lokasi bergantung pada momen yang timbul.

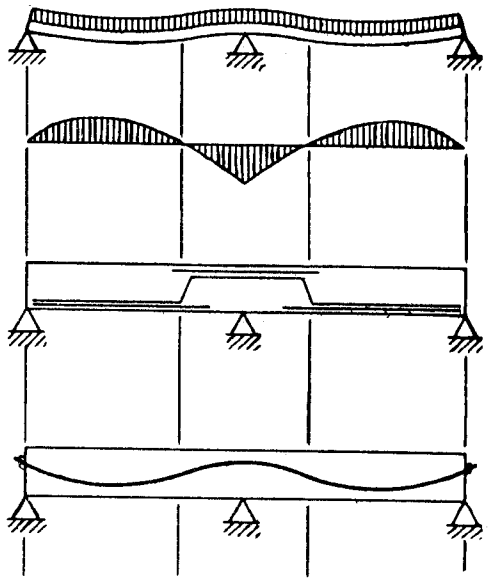
Pada balok menerus dapat pula dilakukan *pascatarik* maupun *prategang*. Gambar 8–13(d) mengilustrasikan cara memberikan kabel pascatarik yang efektif untuk momen lentur yang tergambar. Pembentukan pola kabel seperti ini biasanya sulit dilakukan. Pemberian proses prategang yang menggunakan kelengkungan berbalik di dalam *strands* adalah hal yang sulit dilakukan. Karena pemberian prategang biasanya dilakukan di pabrik (meskipun tidak selalu harus demikian), ada tambahan masalah, yaitu masalah transportasi (balok yang akan dipakai di atas tiga tumpuan harus diangkut dengan kondisi tumpuan sama agar momen lain yang tak diinginkan tidak terjadi). Balok prategang pada umumnya digunakan pada kondisi balok dua tumpuan sederhana.

(a) Pembebanan

(b) Diagram momen

(c) Balok beton bertulang. Tulangan baja diletakan pada daerah tarik.

(d) Balok pascatarik. Kabel dibentuk sesuai dengan momen yang timbul.



GAMBAR 8–13 Penggunaan beton bertulang untuk balok menerus.

SOAL

8–1. Pelajarilah beberapa girder pada jembatan baja jalan raya pada lokasi pembaca termasuk juga bentuk penampang pada seluruh panjangnya. Gambarlah sketsa bentuk itu. beserta lokasi titik konstruksi (apabila ada). Diskusikanlah hal ini.

8–2. Suatu balok mempunyai sendi pada satu ujung P dan jepit pada ujung lainnya. Balok ini dibebani terpusat P pada titik sejauh $x = L/2$ dari tumpuannya. Dengan menggunakan metode analisis pendekatan, estimasikanlah reaksi, gaya geser, dan momen lentur yang timbul pada struktur itu.

8–3. Dengan menggunakan ekspresi yang tertulis pada Bab 8.4.2, tentukan momen desain untuk balok menerus tiga-bentang (ujung-ujungnya integral dengan kolom penumpunya). Tentukanlah momen desain positif dan negatif kritis untuk setiap bentang. Anggap bahwa struktur tersebut memikul beban terdistribusi merata 300 lb/ft dan panjang setiap bentang adalah 30 ft.

8–4. Tinjaulah balok menerus dua-bentang yang terlihat pada Gambar 8–5. Bagaimanakah perubahan diagram momen apabila tumpuan kanan mengalami penurunan vertikal ke bawah relatif terhadap tumpuan lainnya?

Bab 9

STRUKTUR MENERUS : RANGKA KAKU

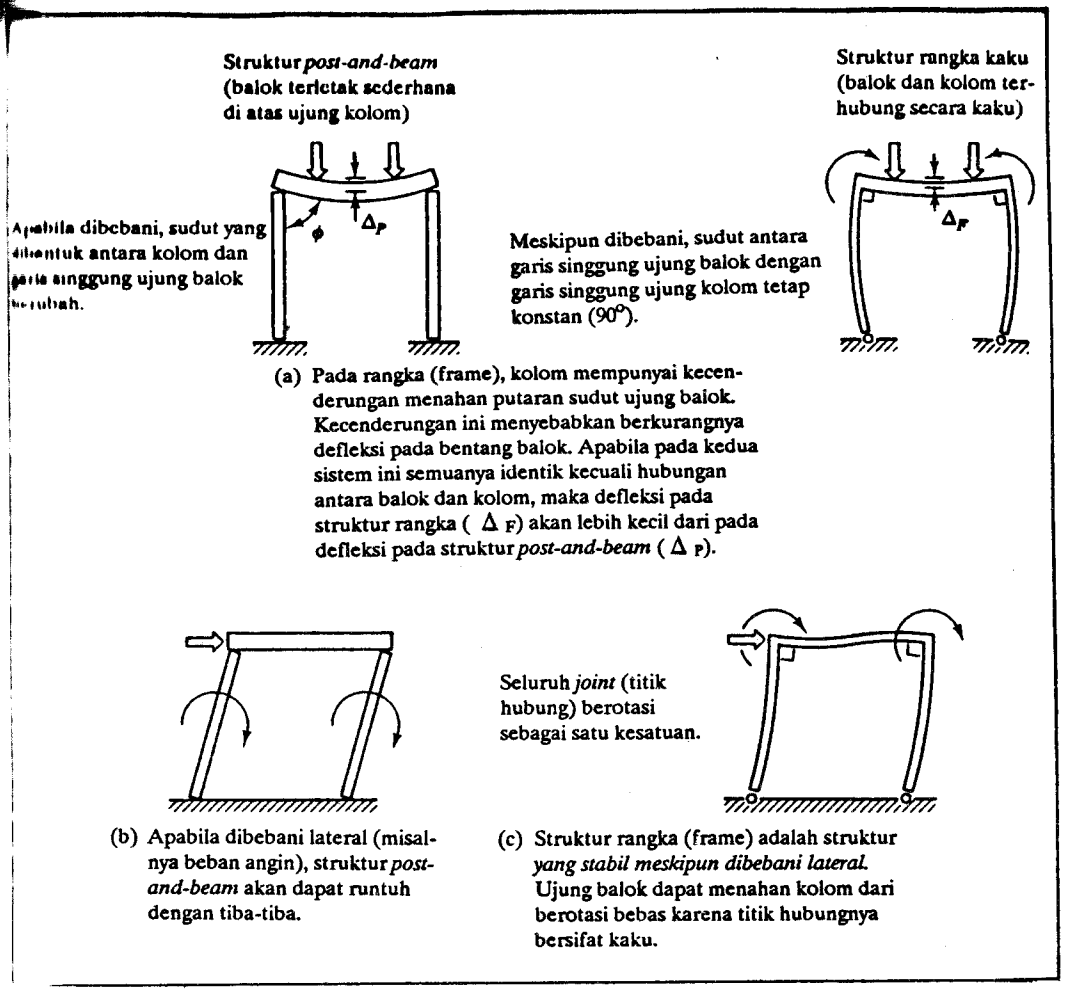
9.1 PENDAHULUAN

Struktur rangka kaku (rigid frame) adalah struktur yang terdiri atas elemen-elemen linear, umumnya balok dan kolom, yang saling dihubungkan pada ujung-ujungnya oleh *joints* (titik hubung) yang dapat mencegah rotasi relatif di antara elemen struktur yang dihubungkannya. Dengan demikian, elemen struktur itu menerus pada titik hubung tersebut. Seperti halnya pada balok menerus, struktur rangka kaku adalah statis tak tentu.

Banyak struktur rangka kaku yang tampaknya sama dengan sistem *post-and-beam*, tetapi pada kenyataannya struktur rangka itu mempunyai perilaku yang sangat berbeda dengan struktur *post-and-beam* karena adanya kekakuan titik hubung pada rangka kaku. Titik hubung dapat cukup kaku sehingga memungkinkan kemampuan untuk memikul beban lateral pada rangka, yang kita ketahui beban demikian tidak dapat bekerja pada struktur *post-and-beam* tanpa adanya tambahan *bracing* (pengekang). Banyak jenis struktur rangka yang telah digunakan sejak dahulu. Sebagai contoh, meja adalah "struktur rangka" yang memperoleh kestabilan dari hubungan kaku antara kaki dengan papan horizontalnya. Pada gedung juga telah banyak digunakan sistem struktur rangka kaku. Penggunaan rangka kaku baja di banyak kota, seperti di Chicago pada akhir abad kesembilan belas dan awal abad kedua puluh, merupakan kejadian penting dalam sejarah perkembangan struktur.

9.2 PRINSIP–PRINSIP UMUM

Cara yang sangat berguna dalam memahami perilaku struktur rangka sederhana adalah dengan membandingkan perilakunya terhadap beban dengan struktur *post and-beam*. Perilaku kedua-duanya berbeda dalam hal titik hubung, yaitu titik hubung ini bersifat kaku pada rangka dan tidak kaku pada struktur *post-and-beam*.



GAMBAR 9-1
Perbedaan antara struktur *post-and-beam* dengan struktur rangka kaku.

9.2.1 Beban Vertikal

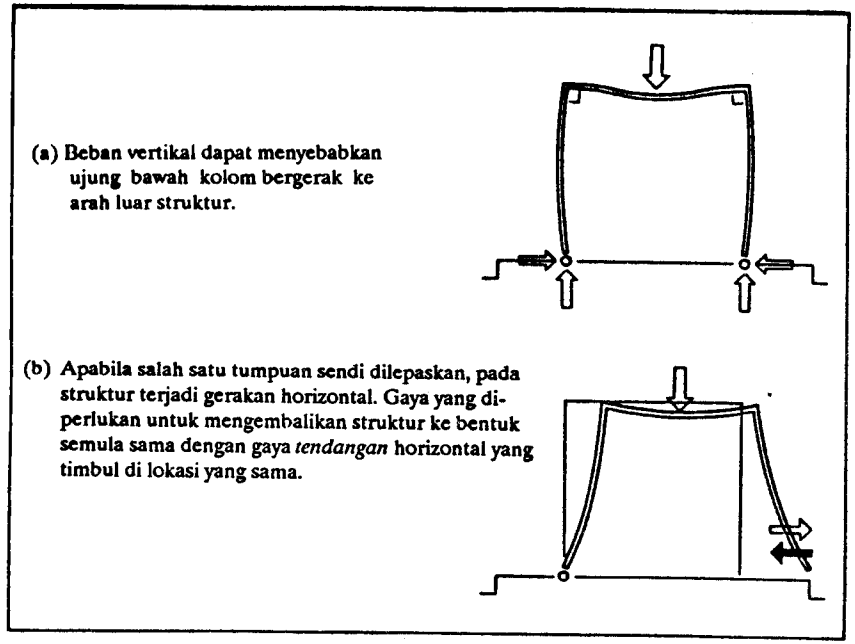
Apabila mengalami beban vertikal, balok pada struktur *post-and-beam* akan memikul beban tersebut, kemudian menyalurkan ke kolom, untuk selanjutnya diteruskan ke tanah. Pada jenis struktur ini, balok terletak bebas di atas kolom. Dengan demikian, pada saat beban menyebabkan timbulnya momen pada balok, ujung-ujung balok berotasi di ujung atas kolom. Jadi, sudut yang dibentuk antara ujung balok dan ujung atas kolom berubah. Kolom tidak mempunyai kemampuan untuk menahan rotasi ujung balok. Hal ini berarti tidak ada momen yang dapat diteruskan ke kolom. Oleh karena itu, kolom hanya memikul gaya aksial.

Apabila suatu struktur rangka kaku mengalami beban vertikal, seperti halnya pada struktur *post-and-beam*, beban tersebut juga dipikul oleh balok, diteruskan ke kolom, dan akhirnya diterima oleh tanah. Beban itu menyebabkan balok tersebut cenderung berotasi. Akan tetapi, pada jenis struktur rangka ini, karena ujung atas kolom dan ujung balok berhubungan secara kaku, maka rotasi bebas pada ujung balok tidak dapat terjadi. Adanya hubungan kaku tersebut mengandung arti kolom cenderung mencegah rotasi bebas balok. Hal ini menyebabkan terjadinya hal-hal penting. Salah satunya adalah balok tersebut lebih bersifat mendekati balok berujung jepit-jepit (bukan terletak sederhana). Seiring dengan hal tersebut, kita peroleh keuntungan-keuntungan yang umum diperoleh dari struktur balok berujung jepit-jepit sebagaimana telah dibahas pada Bab 8 (bertambahnya kekakuan, berkurangnya defleksi, dan berkurangnya momen lentur internal). Hal lain yang penting sebagai akibat hubungan kaku adalah bahwa karena ujung kolom cenderung memberikan tahanan rotasionalnya, maka kolom menerima juga momen lentur selain tentu saja menerima gaya aksial. Hal ini berarti desain kolom menjadi relatif lebih rumit dibandingkan dengan desain kolom yang hanya memikul gaya aksial.

Titik hubung kaku tidak dapat benar-benar memberikan tahanan rotasi. Karena dibebani, maka balok cenderung berotasi, yang berarti juga menyebabkan kolom cenderung berotasi. Dengan demikian, titik hubung itu berfungsi sebagai satu kesatuan, yang berarti apabila titik hubung itu berotasi, maka sudut relatif antara elemen elemen yang dihubungkan tidak berubah (apabila sudut antara balok dan kolom semula 90°, setelah titik hubung berotasi, sudut tersebut tetap 90°). Besar rotasi titik hubung ini bergantung pada *kekakuan* relatif antara balok dan kolom. Apabila kolom semakin kaku relatif terhadap balok, maka kolom lebih mendekati sifat jepit (terhadap ujung balok) sehingga rotasi titik hubung semakin kecil. Bagaimana pun, rotasi (meskipun kecil) selalu terjadi. Jadi, kondisi ujung balok (pada struktur rangka kaku) terletak di antara kondisi ujung jepit-jepit (tidak ada rotasi sama sekali) dan kondisi ujung sendi-sendi (bebas berotasi). Begitu pula halnya dengan ujung atas kolom.

Dari tinjauan desain, perilaku yang dijelaskan di atas secara umum berarti bahwa balok pada sistem rangka kaku yang memikul beban vertikal dapat didesain lebih kecil daripada balok pada sistem *post-and-beam*, karena berkurangnya momen yang harus dipikul. Sementara itu, kolom pada struktur kaku harus didesain relatif lebih besar dibandingkan dengan pada struktur *post-and-beam* karena adanya kombinasi momen lentur dan gaya aksial (kita ingat, pada kolom struktur *post-and-beam* hanya terjadi gaya aksial). Ukuran relatif kolom ini akan semakin dipengaruhi apabila tekuk juga ditinjau karena kolom pada struktur rangka mempunyai tahanan ujung, sedangkan kolom pada *post-and-beam* tidak.

Sebagai respons terhadap beban vertikal, perbedaan lain antara struktur rangka kaku dengan struktur *post-and-beam* adalah adanya reaksi horizontal pada struktur rangka kaku, sementara pada struktur *post-and-beam* tidak ada. Adanya gaya horizontal ini dapat mudah dimengerti apabila kita meninjau dahulu struktur rangka kaku yang salah satu tumpuan sendinya kita ubah menjadi rol yang dapat bergerak horizontal. Bentuk defleksinya akan seperti terlihat pada gambar 9–2. Karena pada kenyataannya tumpuan tersebut adalah sendi (atau mungkin jepit), maka harus



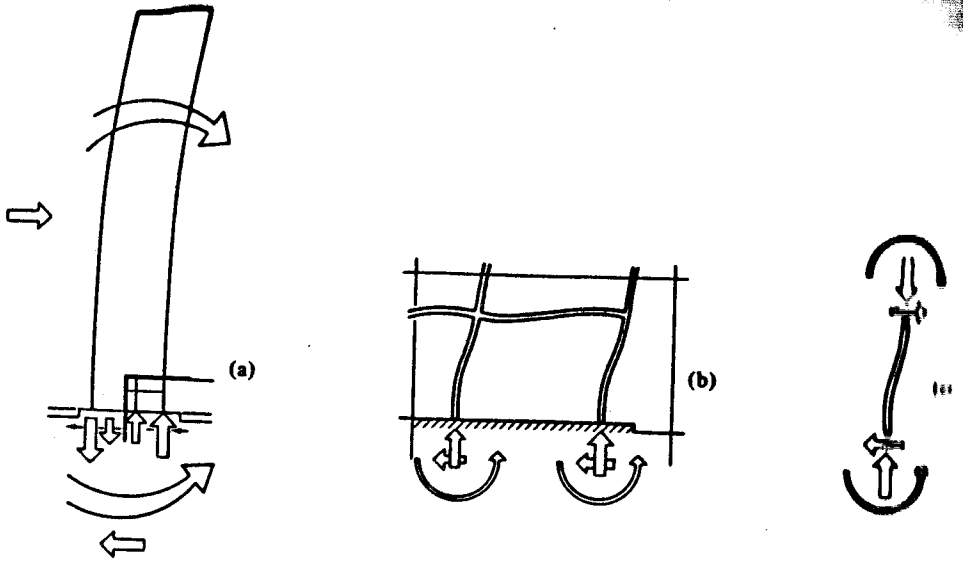
GAMBAR 9-2
Gaya *dorong (thrust)* pada struktur rangka kaku yang memikul beban vertikal.

ada gaya horizontal yang mempertahankan posisi titik tumpuan semula. Sebagaimana akan dibahas berikut ini, besar reaksi horizontal (yang sama besar dengan gaya dorong tersebut) dan momen pada kolom mempunyai hubungan langsung.

Fondasi untuk rangka harus didesain untuk memikul gaya dorong horizontal yang ditimbulkan oleh beban vertikal yang bekerja padanya. Pada struktur *post-and-beam* yang dibebani vertikal tidak ada gaya dorong horizontal tersebut, jadi tidak ada reaksi horizontal. Dengan demikian, fondasi struktur *post-and-beam* relatif lebih sederhana dibandingkan dengan fondasi struktur rangka kaku.

9.2.2 Beban Horizontal

Terhadap beban horizontal, struktur *post-and-beam* dengan struktur rangka kaku sangat berbeda. Struktur *post-and-beam* dapat dikatakan hampir tidak mempunyai kemampuan sama sekali untuk memikul beban horizontal. Adanya sedikit kemampuan pada umumnya hanyalah karena berat sendiri elemen tiang (post), atau adanya kontribusi elemen lain (misalnya dinding penutup) yang secara tidak langsung berfungsi sebagai *bracing*. Akan tetapi, perlu diingat bahwa kemampuan memikul beban horizontal pada struktur *post-and-beam* ini sangat kecil. Oleh karena itu, struktur rangka *post-and-beam* tidak dapat digunakan untuk memikul beban horizontal seperti beban gempa dan beban angin.



(a) Gaya angin yang bekerja di muka gedung menimbulkan momen guling dan gaya translasi horizontal. Reaksi yang timbul di dasar gedung harus dapat mengimbangi gaya dan momen tersebut.

(b) Kolom tingkat bawah: diagram deformasi (dibesarkan). Gaya lateral dapat menyebabkan kolom berdeformasi seperti tergambar. Momen lentur dan kelengkungan terjadi pada balok maupun pada kolom.

(c) Diagram benda bebas kolom: kolom umumnya mengalami gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur. Balok juga mengalami gaya- gaya tersebut.

GAMBAR 9-3
Efek beban lateral pada struktur rangka kaku bertingkat banyak.

Sebaliknya, pada struktur rangka kaku ada kemampuan memikul beban lateral apabila memang didesain dengan benar. Karena adanya titik hubung kaku, balok dapat menahan kolom dari rotasi bebas yang diakibatkan oleh beban horizontal. Dengan demikian, kekakuan balok mempunyai kontribusi dalam memberikan tahanan terhadap beban lateral pada rangka kaku. Balok juga berfungsi untuk meneruskan beban lateral dari satu kolom ke kolom lainnya.

Aksi beban lateral pada rangka menimbulkan lentur, gaya geser, dan gaya aksial pada semua elemen (balok maupun kolom). Momen lentur yang diakibatkan oleh beban lateral (angin atau gempa) sering kali mencapai maksimum pada penampang dekat titik hubung. Dengan demikian, ukuran elemen struktur di bagian dekat titik hubung pada umumnya dibuat lebih besar atau diperkuat apabila gaya lateral cukup besar.

Rangka kaku dapat diterapkan pada gedung besar maupun kecil. Banyak gedung bertingkat tinggi yang menggunakan rangka kaku untuk memikul beban vertikal maupun horizontal. Secara umum, semakin tinggi gedung tersebut, akan semakin besar pula momen dan gaya-gaya pada setiap elemen struktur. Kolom terbawah pada

gedung bertingkat banyak pada umumnya memikul gaya aksial dan momen lentur terbesar, seperti terlihat pada Gambar 9-3. Apabila beban lateral ini sudah sangat besar, maka umumnya diperlukan kontribusi elemen struktur lain untuk memikulnya, misalnya dengan menggunakan *bracing* (pengekang) atau dinding geser (shear walls). Bahkan pada gedung bertingkat rendah sekalipun, *bracing* sering digunakan untuk memikul beban lateral karena biasanya struktur rangka (balok dan kolom berhubungan kaku) saja tidak cukup.

9.3 ANALISIS RANGKA KAKU

9.3.1 Metode Analisis Pendekatan

Pendekatan Umum. Di sini akan dibahas metode untuk menentukan nilai pendekatan untuk reaksi, geser, dan momen pada struktur rangka kaku. Seperti halnya struktur balok menerus, struktur rangka kaku adalah struktur statis tak tentu. Jadi, reaksi, gaya geser, dan momen lentur tidak dapat ditentukan langsung hanya dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika ($\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M_o = 0$). Pada struktur statis tak tentu terdapat anu (sesuatu yang tak diketahui, *unknowns)* lebih banyak daripada banyak persamaan keseimbangan statika. Pada struktur statis tak tentu diperlukan karakteristik penampang (bentuk, ukuran, dan material) selain juga dimensi struktur menyeluruh (panjang elemen struktur).

Metode analisis yang diuraikan di sini didasarkan atas asumsi penyederhanaan. Oleh karena itu, solusinya pun hanya merupakan solusi pendekatan. Sekalipun demikian, analisis pendekatan yang diuraikan di sini sangat berguna dalam tahap prarencana untuk menentukan bentuk dan ukuran elemen struktur. Estimasi ini dapat dipakai untuk analisis selanjutnya, dengan menggunakan metode yang lebih eksak.

Banyak asumsi yang dapat dibuat untuk analisis pendekatan ini merupakan hal yang penting diperhatikan karena semakin banyak asumsi yang dibuat, semakin tidak eksak solusinya. Cara praktis yang berguna adalah dengan menggunakan sejumlah cukup asumsi, yang masing-masing dapat memberikan persamaan atau hubungan independen, sedemikian hingga kita dapat melakukan analisis selanjutnya hanya dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika dasar. Metode analisis yang efektif adalah yang didasarkan atas asumsi lokasi momen internal nol (titik belok). Lokasi ini mula-mula diestimasi dengan meninjau bentuk struktur terdefleksi. Pada dasarnya teknik ini sama dengan yang telah dibahas pada Bab 8 untuk struktur balok menerus.

Rangka Satu Bentang: Beban Lateral. Kita akan menganalisis dua rangka kaku yang mengalami beban lateral dengan menggunakan metode pendekatan. Yang akan kita tinjau dahulu adalah rangka kaku satu bentang yang mempunyai tumpuan kolom berupa sendi. Rangka lain yang akan ditinjau selanjutnya identik dengan rangka pertama, tetapi pada rangka ini tumpuan kolom adalah jepit. Pada kedua kasus tersebut kita beranggapan bahwa beban lateral yang dipikul oleh struktur adalah beban terpusat pada titik hubung atas kolom. Lokasi dan jenis eksak beban lateral yang

harus dipikul oleh suatu rangka pada gedung aktual bergantung pada jenis beban yang ditinjau (apakah beban gempa ataukah beban angin). Pada analisis sebenarnya kita harus menentukan secara eksak bagaimana memodelkan beban tersebut. Untuk saat ini kita langsung berasumsi ada suatu beban terpusat pada titik hubung.

Pada Gambar 9–4 diperlihatkan reaksi untuk rangka pertama. Ada empat reaksi yang belum diketahui (R_{A_H}, R_{A_V}, R_{D_H}, dan R_{D_V}), sedangkan persamaan keseimbangan statika hanya ada tiga ($\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M_o = 0$). Dengan demikian jelaslah rangka ini adalah struktur statis tak tentu derajat satu. Namun pada rangka ini kita masih dapat mencari rekasi vertikal R_{A_V} dan R_{D_V} dengan menuliskan jumlah momen (akibat beban luar dan gaya reaksi) terhadap salah satu titik tumpuan (lokasi momen sama dengan nol). Dengan demikian, untuk keseluruhan struktur: $\Sigma M_A = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma F_x = 0$ akan menghasilkan

$$-Ph + R_{A_V}(0) + R_{A_H}(0) + R_{D_V}(L) + R_{D_H}(0) = 0 \qquad R_{D_V} = \frac{Ph}{L} \uparrow$$

$$-R_{A_V} + R_{D_V} = 0 \qquad -R_{A_V} + \frac{Ph}{L} = 0 \qquad R_{A_V} = \frac{Ph}{L} \downarrow$$

$$+P - R_{A_H} - R_{D_H} = 0 \qquad R_{A_H} + R_{D_H} = P$$

Jelas bahwa gaya reaksi ini dapat diperoleh hanya karena kondisi khusus bahwa kedua reaksi horizontal (yang belum kita ketahui besarnya) melalui titik pusat momen yang kita ambil. Kita tidak mungkin menentukan reaksi horizontal R_{A_H} dan R_{D_H} hanya dengan persamaan keseimbangan.

Untuk melanjutkan analisis ini kita akan menggunakan fakta bahwa pada semua segmen-elemen struktur terdapat titik belok. Dengan menggambarkan sketsa bentuk defleksi struktur tersebut, lokasi titik belok akan dapat diestimasi. Dalam hal ini titik belok diestimasi di tengah bentang, seperti terlihat pada Gambar 9–4(a). Dengan telah ditentukannya lokasi titik belok, kita juga mengetahui lokasi momen internal nol pada struktur, yaitu pada titik belok tersebut. Dengan demikian kita memperoleh persamaan tambahan yang berasal dari kondisi momen nol. Jadi, struktur itu dapat kita modelkan menjadi struktur statis tertentu (tiga sendi). Kita pisahkan struktur itu menjadi dua bagian di kiri dan kanan titik belok tersebut seperti terlihat pada Gambar 9–4 (b). Jadi, untuk struktur bagian kiri:

$$\sum M_N = 0:$$

$$P(0) + R_{A_V}\left(\frac{L}{2}\right) - R_{A_H}(h) = 0$$

$$\left(\frac{Ph}{L}\right)\left(\frac{L}{2}\right) = R_{A_H}(h) \qquad R_{A_H} = \frac{P}{2} \leftarrow$$

Dengan meninjau keseimbangan gaya horizontal keseluruhan struktur, kita akan dapat memperoleh R_{A_H}. Jadi:

(a) Bentuk rangka terdefleksi.

(b) Diagram benda bebas untuk bagian-bagian rangka yang dipisahkan pada titik belok (titik momen sama dengan nol).

(c) Diagram benda bebas balok, kolom dan titik hubung. Karena segmen-segmen tersebut tidak dipisahkan pada titik momen nol, maka ada momen internal pada gambar ini.

(d) Diagram momen. Gaya geser dan gaya aksial juga ada pada balok maupun kolom.

GAMBAR 9–4
Analisis penyederhanaan untuk rangka kaku satu bentang yang memikul beban lateral.

$\Sigma F_x = 0$ (seluruh struktur):

$$R_{A_H} + R_{D_H} = P \qquad \frac{P}{2} + R_{D_H} = P \qquad R_{D_H} = \frac{P}{2}$$

Dengan demikian, semua reaksi telah kita peroleh. Perhatikan bahwa anggapan titik belok di tengah balok mengandung arti bahwa reaksi horizontal sama. Karena semua reaksi telah diketahui, maka gaya geser V, momen M, dan gaya N pada struktur dapat diperoleh dengan meninjau setiap elemen [lihat diagram benda bebas pada Gambar 9–4 (b)]. Kita akan menggunakan notasi sebagai berikut:

M_{xy} = momen pada elemen struktur x–y di ujung elemen struktur yang berkumpul di titik hubung x.

Gaya geser dan aksial juga diberi notasi demikian. Jadi, untuk rangka tersebut

Kolom kiri:

$$M_{BA} = \left(\frac{P}{2}\right)h = \frac{Ph}{2}$$

$$V_{BA} = \frac{P}{2}$$

$$N_{BA} = \frac{Ph}{L} \qquad \text{(tarik)}$$

Kolom kanan:

$$M_{CD} = \left(\frac{P}{2}\right)h = \frac{Ph}{2}$$

$$V_{CD} = \frac{P}{2}$$

$$N_{CD} = \frac{Ph}{L} \qquad \text{(tekan)}$$

Balok:

$$M_{BC} = \left(\frac{Ph}{L}\right)\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{Ph}{2}$$

$$M_{CB} = \left(\frac{Ph}{L}\right)\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{Ph}{2}$$

$$V_{CB} = V_{BC} = \frac{Ph}{L}$$

$$N_{CB} = N_{BC} = \frac{P}{2} \qquad \text{(tekan)}$$

Momen dengan mudah dapat diperoleh dengan mengalikan gaya dengan jarak. Diagram benda bebas yang diperlihatkan pada Gambar 9–4 (c) menunjukkan bagaimana struktur tersebut dapat diuraikan atas elemen-elemen balok, kolom, dan titik

hubung. Konsep mengisolasi titik hubung rangka dan meninjau keseimbangannya sama dengan yang telah kita gunakan pada analisis rangka batang. Perbedaan yang ada hanyalah pada rangka batang titik hubungnya berupa sendi sehingga tidak muncul momen, dan keseimbangan yang perlu ditinjau adalah keseimbangan translasional (vertikal dan horizontal). Pada rangka, titik hubungnya adalah kaku, jadi ada momen pada ujung-ujung elemen struktur yang dihubungkan. Oleh karena itu, keseimbangan tiap titik hubung harus memenuhi keseimbangan rotasional (momen) selain juga keseimbangan translasional. Dengan menggunakan diagram benda bebas seperti di atas, kita dapat memperoleh momen cukup dengan meninjau keseimbangan rotasional.

Cara keseimbangan titik hubung. Seperti yang telah kita tinjau, momen di puncak kolom B–A diakibatkan oleh reaksi horizontal:

Kolom B–A:

$$M_{BA} = \left(\frac{P}{2}\right)h$$

Jadi, pada titik hubung B ada momen yang sama besar dengan momen di atas, tetapi berlawanan arah. Agar keseimbangan rotasional terpenuhi, maka harus ada momen pada B–C. Momen ini timbul pada balok.

Titik hubung B:

$$-M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{BC} = \frac{Ph}{2}$$

Peninjauan yang sama juga dapat dilakukan untuk kolom C–D dan titik hubung D:

Kolom C–D:

$$M_{CD} = \left(\frac{P}{2}\right)h$$

Titik hubung C:

$$-M_{CD} + M_{CB} = 0$$

$$M_{CB} = \frac{Ph}{2}$$

Terlihat bahwa momen ujung balok ini sama dengan yang telah kita peroleh sebelumnya. Gambar 9–4 (c) tidak hanya memperlihatkan keseimbangan momen balok, kolom, dan titik hubung, tetapi juga keseimbangan gaya vertikal dan horizontal.

Diagram momen dapat digambarkan setiap balok dan kolom. Dengan meninjau gaya-gaya yang ada, terlihat jelas bahwa semua elemen struktur mempunyai diagram momen yang bervariasi secara linear, dengan nilai maksimum di titik hubung dan momen nol terjadi di titik belok serta titik tumpuan sendi.

Kita telah menggunakan perjanjian tanda momen lentur untuk elemen struktur horizontal (balok), yaitu momen lentur positif apabila terjadi tegangan tarik di sisi bawah penampang. Untuk menggambarkan diagram momen elemen struktur vertikal kita perlu membuat perjanjian tanda khusus. Cara yang umum dilakukan adalah

dengan meninjau gambar struktur tersebut dari kanan, jadi kolom-kolom struktur vertikal) akan tampak bagian mana yang merupakan sisi atas dan bagian mana yang merupakan sisi bawah. Cara lain yang juga umum dilakukan adalah dengan menggambarkan diagram momen pada sisi yang tertekan, tidak peduli bagaimana pun orientasi elemen struktur tersebut. Dengan cara terakhir ini kita tidak perlu memberi tanda positif maupun negatif. Cara inilah yang kita gunakan dalam menggambarkan diagram momen pada Gambar 9–4. Hal ini mengakhiri analisis rangka pertama.

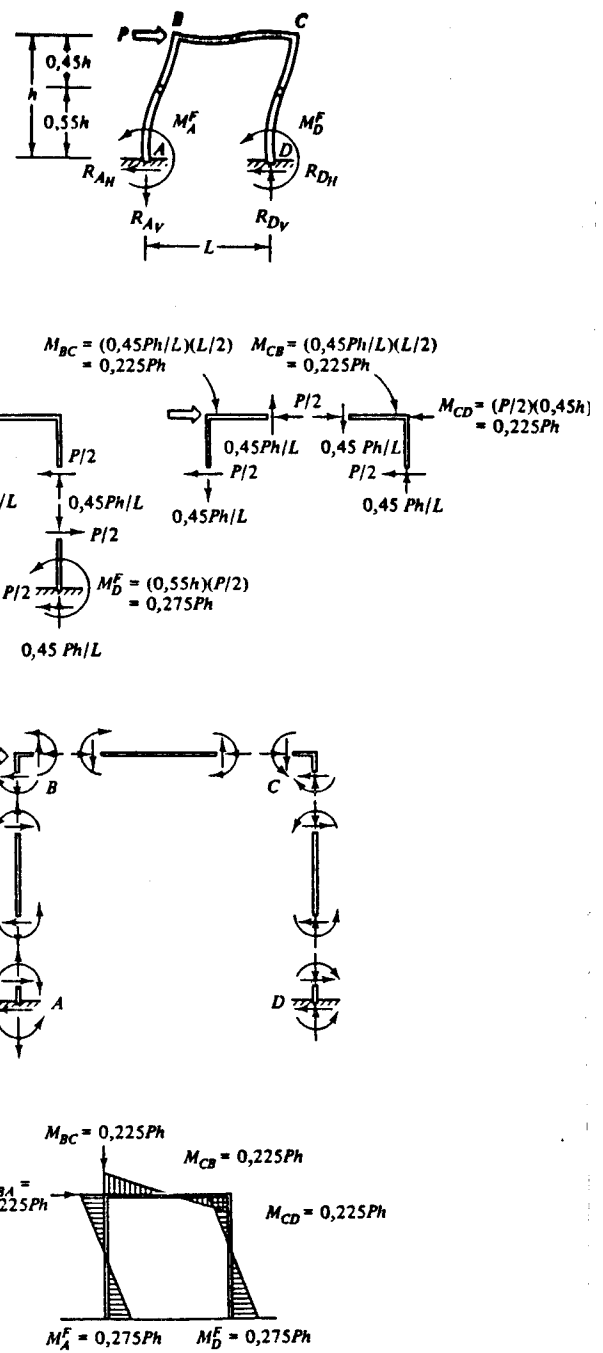
Rangka kaku lain yang akan kita analisis adalah yang terlihat pada Gambar 9–5(a). Rangka ini identik dengan yang telah kita bahas terdahulu, tetapi ada perbedaan pada tumpuannya, yaitu berupa jepit, bukan sendi. Pada Gambar 9–5(a) diperlihatkan momen dan reaksi yang timbul pada tumpuan. Terlihat ada enam reaksi yang belum diketahui (R_{A_H}, R_{A_V}, M^F_A, R_{D_H}, R_{D_V}, dan M^F_D), sedangkan kita hanya mempunyai tiga persamaan keseimbangan statika. Dengan demikian rangka ini adalah struktur statis tak tentu derajat tiga. Karena kita hanya akan melakukan analisis dengan statika, maka kita perlu membuat tiga asumsi. Seperti pada contoh terdahulu, kita menggambarkan dahulu sketsa defleksi struktur rangka tersebut. Terlihat jelas bahwa ada tiga titik belok pada kurva defleksi, yaitu satu di tengah balok dan dua pada masing-masing kolom. Sebenarnya letak titik belok kolom tidak dapat di tengah tinggi karena ada rotasi titik hubung. Titik belok dapat terjadi tepat di tengah tinggi kolom hanya jika titik hubung bertranslasi horizontal tanpa berotasi. Adanya rotasi titik hubung (searah jarum jam) menyebabkan titik belok pada kolom sedikit ke atas, tidak tepat di tengah, seperti terlihat pada Gambar 9–5(a).

Dengan menetapkan lokasi titik belok tersebut, kita dapat melakukan analisis dengan statika. Rangka itu kita uraikan pada titik belok, yang sudah kita ketahui merupakan titik momen nol, seperti yang telah kita lakukan pada rangka pertama (jadi, gaya aksial dan gaya geser dapat diperoleh dengan menuliskan momen nol pada titik belok). Analisisnya secara lengkap diperlihatkan pada Gambar 9–5(b).

Perhatikan bahwa apabila rangka ini kita uraikan atas dua bagian, yaitu bagian atas dan bawah titik belok kedua kolom, maka analisis bagian atas akan serupa dengan analisis rangka pertama (yang tumpuannya sendi). Diagram momen selengkapnya terlihat pada Gambar 9–5(d).

Perhatikan bahwa momen yang kita peroleh pada setiap elemen struktur (balok dan kedua kolom) pada rangka kedua (yang bertumpuan jepit) lebih kecil dibandingkan dengan yang kita peroleh pada rangka pertama (yang bertumpuan sendi).

Rangka Satu Bentang: Beban Vertikal. Proses umum analisis pendekatan pada rangka yang memikul beban vertikal hampir sama dengan analisis rangka yang mengalami beban **lateral**. Perhatikan rangka kaku pada Gambar 9–6(a) yang mempunyai tumpuan sendi di kedua kaki kolom. Langkah pertama analisis adalah menggambarkan sketsa bentuk defleksi rangka dan menetapkan titik belok seperti terlihat pada Gambar 9–6(a).



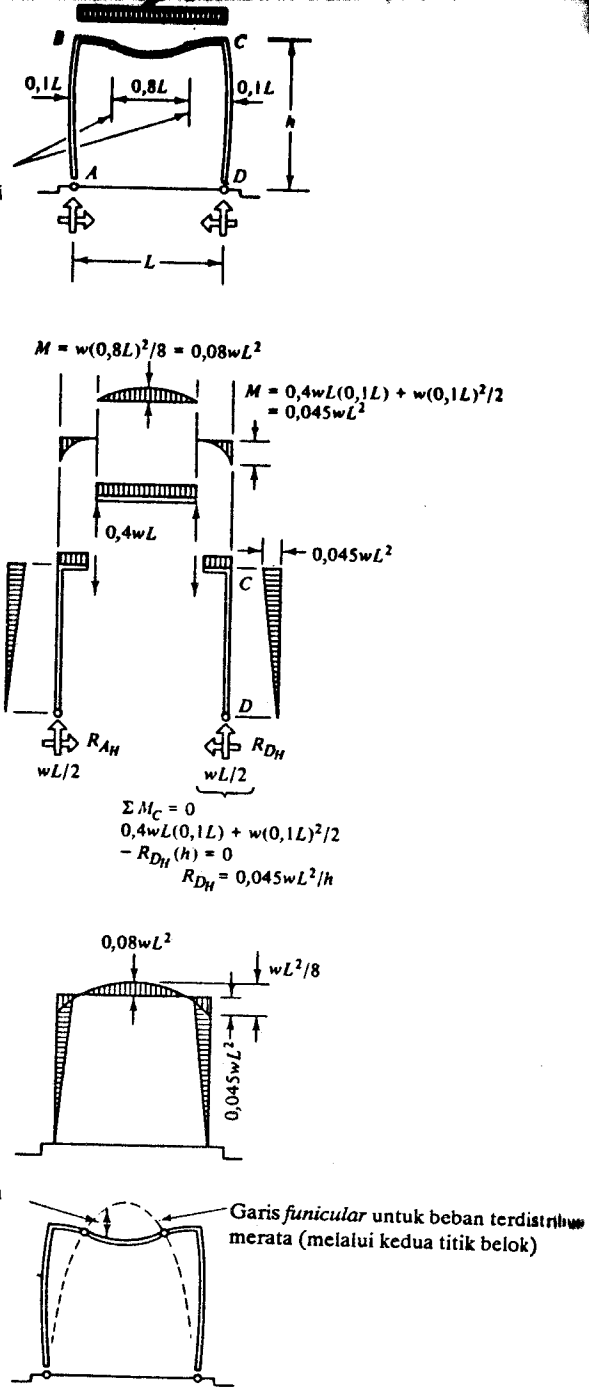
a) Bentuk rangka terdefleksi

b) Diagram benda bebas untuk bagian-bagian rangka yang dipisahkan pada titik belok (titik momen sama dengan nol)

Diagram benda bebas balok, kolom, dan titik hubung. Karena segmen-segmen tersebut tidak dipisahkan pada titik momen nol, maka ada momen internal pada gambar ini. Setiap segmen harus berada dalam keseimbangan translasional maupun rotasional.

c) Diagram momen. Gaya geser dan gaya aksial juga ada pada balok maupun kolom.

GAMBAR 9–5
Analisis penyederhanaan rangka kaku satu bentang yang memikul beban lateral.



(a) Rangka yang dibebani. Titik belok terjadi di dekat ujung- ujung balok. Lokasinya dianggap seperti tergambar.

Lokasi titik belok

(b) Diagram benda bebas bagian-bagian rangka yang dipisahkan pada titik belok. Geser, momen dan gaya aksial diperoleh dengan menggunakan analisis statika.

(c) Diagram momen

Sebanding dengan momen

(d) Momen yang timbul sebanding dengan deviasinya dari bentuk *funicular* untuk beban tersebut.

GAMBAR 9–6
Analisis penyederhanaan rangka kaku satu bentang yang memikul beban vertikal.

Penentuan titik belok untuk rangka yang dibebani vertikal sedikit lebih sulit dibandingkan dengan rangka yang dibebani lateral. Apabila titik hubung tak dapat berputar sama sekali (jadi bersifat jepit penuh), lokasi titik belok pada balok adalah $0,21L$ dari kedua ujung balok (lihat Bab 8.3). Karena sebenarnya terjadi rotasi titik hubung, tetapi bukan rotasi bebas seperti sendi, maka kondisi ujung balok ini terletak di antara kondisi jepit penuh dan sendi. Dengan demikian, lokasi titik belok adalah antara $0L$ dan $0,21\ L$ dari titik hubung. Untuk ukuran perbandingan kekakuan balok dan kolom yang umum dijumpai, lokasi tersebut sekitar $0,1\ L$ dari kedua ujung balok. Seperti yang akan dibahas lebih rinci pada Bab 9.3.2, lokasi eksak titik belok sangat peka terhadap kekakuan relatif antara balok dan kolom.

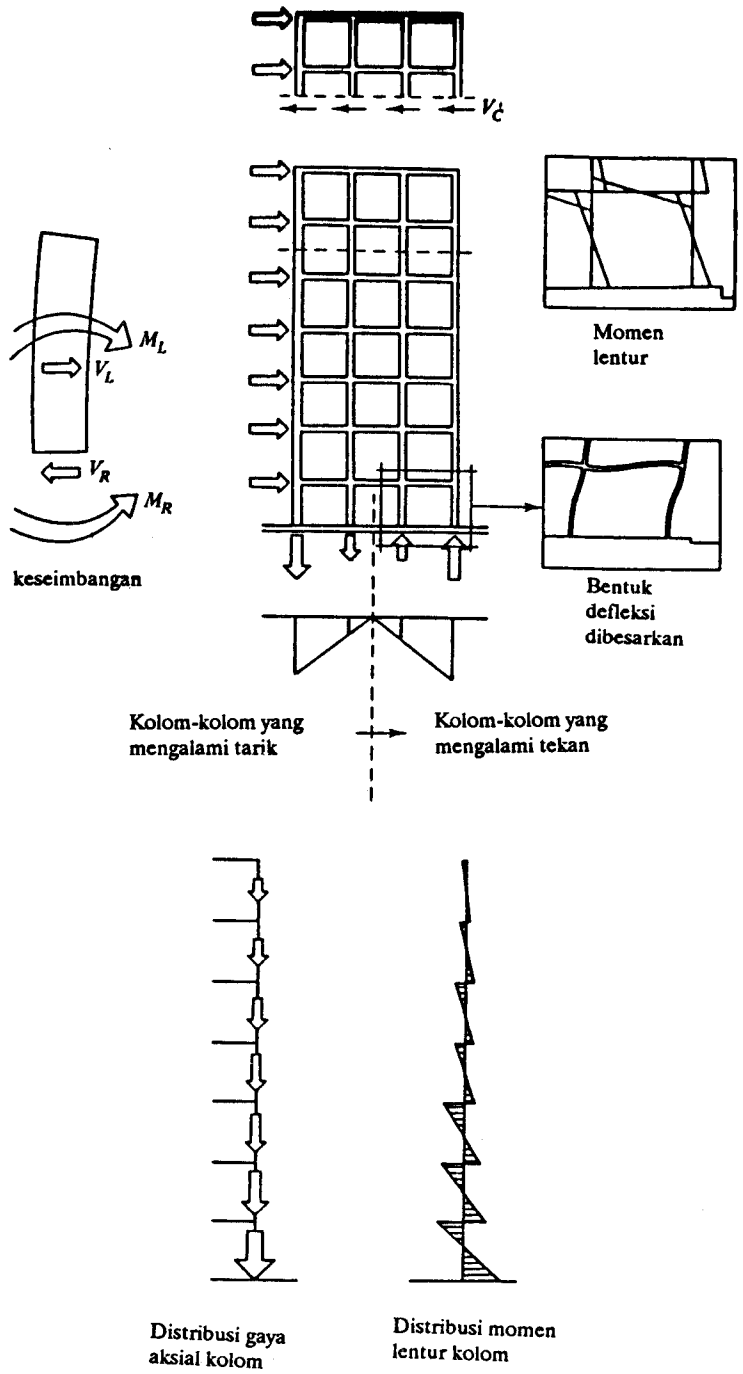
Dengan demikian, pada contoh ini kita mengasumsikan lokasi titik belok pada jarak $0,1\ L$ dari kedua ujung balok. Kita pisahkan rangka tersebut di lokasi titik belok dan kita lakukan analisis statika (keseimbangan) pada masing-masing bagian sehingga kita peroleh diagram momen seperti terlihat pada Gambar 9–6(c).

Jelas bahwa beban vertikal pada struktur ini menyebabkan timbulnya momen, baik pada balok maupun pada kolom. Momen maksimum pada balok dapat terjadi di tengah bentang maupun di ujung-ujungnya. Momen maksimum pada kolom hanya terjadi di ujung-ujungnya.

Rangka Bertingkat Banyak: Beban Lateral. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan analisis rangka bertingkat banyak yang mengalami beban lateral. Salah satunya adalah *metode kantilever* yang pertama kali diperkenalkan pada tahun 1908. Pada metode ini digunakan banyak asumsi, termasuk juga asumsi yang telah kita gunakan pada contoh-contoh di atas. Pada umumnya, asumsi pada metode kantilever adalah:

1. ada titik belok di tengah bentang setiap balok;
2. ada titik belok di tengah tinggi setiap kolom; dan
3. besar gaya aksial yang terjadi di setiap kolom pada suatu tingkat sebanding dengan jarak horizontal kolom tersebut ke pusat berat semua kolom di tingkat tersebut.

Asumsi-asumsi ini secara diagram diilustrasikan dalam Gambar 9–7. Gambar itu juga mengilustrasikan tinjauan perilaku rangka bertingkat banyak yang mengalami beban. Di semua elemen struktur timbul momen lentur. Besar momen ini bergantung pada besar gaya geser resultan V_L (jumlah semua beban lateral) di atas dan di tingkat yang ditinjau). Gaya geser ini harus diimbangi oleh gaya geser internal tahanan (V_{c_1}, V_{c_2}, . . . V_{C_n}) yang timbul di dalam kolom tingkat tersebut. Jadi haruslah $V_L = \Sigma V_{C_i}$. Momen di ujung setiap kolom sama dengan gaya geser dikalikan dengan momennya (setengah tinggi kolom). Karena gaya geser total V_L yang lebih besar terjadi di lantai bawah daripada di lantai atas, momen lentur pada balok dan kolom pada tingkat bawah relatif lebih besar daripada di tingkat atas.



GAMBAR 9–7 Rangka bertingkat banyak.

Metode analisis yang lebih eksak adalah yang menggunakan komputer (lihat Lampiran 11). Sekalipun kurang eksak, metode kantilever masih berguna untuk mempelajari perilaku struktur bertingkat banyak. Penjelasan lebih rinci mengenai metode kantilever dapat diperoleh dari rujukan lain.*

Rangka Bertingkat Banyak: Beban Vertikal. Besar gaya dan momen pada rangka bertingkat banyak yang diakibatkan oleh beban vertikal dapat diestimasi dengan cara yang sama dengan yang telah kita lakukan pada rangka satu bentang. Lokasi titik belok dapat ditentukan pada jarak 0,1 ℓ dari kedua ujung balok. Asumsi ini mempunyai efek adanya balok statis tertentu di antara kedua titik belok setiap balok. Momen positif dan negatif dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika.

Struktur Vierendeel. Sejauh ini kita baru membahas rangka kaku yang digunakan secara vertikal. Rangka dapat juga digunakan secara horizontal seperti terlihat pada Gambar 9–8, dan kita sebut *struktur Vierendeel.* Struktur ini tampak seperti rangka batang yang batang diagonalnya dihilangkan. Perlu diingat bahwa struktur ini adalah rangka (bukan rangka batang), jadi titik hubungnya kaku. Struktur demikian digunakan pada gedung apabila, karena alasan fungsional, kita tidak dapat menggunakan elemen struktur diagonal. Struktur *Vierendeel* ini pada umumnya lebih efisien daripada struktur rangka batang.

Kita dapat melakukan analisis pada struktur *Vierendeel* seperti analisis yang telah kita lakukan pada rangka vertikal. Lokasi titik belok diestimasi dahulu, dan kita gunakan untuk menentukan gaya geser, momen lentur, dan gaya aksial internal pada setiap elemen struktur.

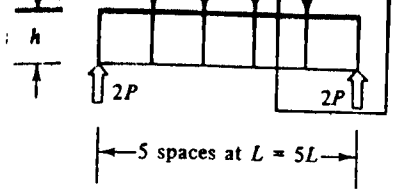
Momen internal yang terjadi biasanya lebih besar pada elemen struktur di dekat tumpuan ketimbang pada elemen struktur di tengah. Distribusi demikian merefleksikan fakta bahwa gaya geser *overall* yang menyebabkan geser momen lentur Lokal pada elemen struktur, semakin dekat tumpuan akan semakin besar. Gaya aksial pada elemen struktur atas dan bawah di tengah bentang merupakan yang terbesar. Hal ini merefleksikan distribusikan momen *overall* yang semakin ke tengah bentang, semakin besar. Pola distribusi gaya aksial ini sama dengan yang telah kita jumpai pada rangka batang.

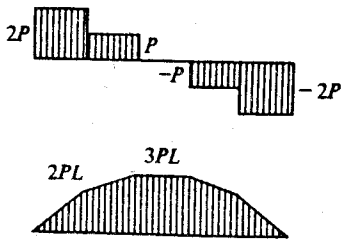
9.3.2 Pentingnya Kekakuan Relatif Balok dan Kolom

Pada setiap struktur statis tentu, termasuk juga rangka (frame), besar momen dan gaya internal yang terjadi pada akhir analisis bergantung pada karakteristik relatif antara elemen strukturnya. Pada analisis pendekatan yang telah dibahas di atas kita belum secara eksplisit memperhatikan hal ini. Akan tetapi, secara implisit kita sudah beranggapan bahwa karakteristik dalam analisis contoh-contoh di atas adalah karakteristik normal yang umum dijumpai.

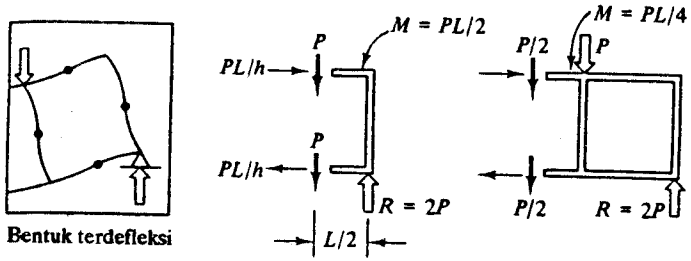
---

* Lihat misalnya J. McCormac, *Structural Analysis,* ist ed., International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania, 1960.

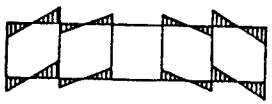


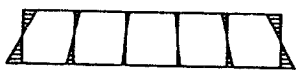


(a) Diagram momen dan geser untuk kondisi pembebanan tergambar. Struktur tersebut harus mampu memikul geser dan momen ini.

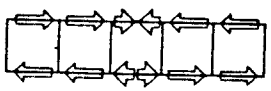


(b) Penentuan gaya geser, momen lentur, dan gaya aksial pada elemen-elemen struktur

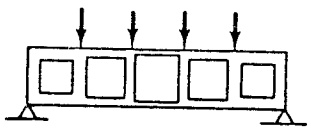




(c) Momen lentur pada setiap elemen bergantung pada besar gaya geser eksternal yang bekerja pada struktur. Momen semakin besar terjadi pada elemen yang semakin ke ujung (di mana gaya geser eksternalnya paling besar), dan semakin kecil di bagian tengah struktur.

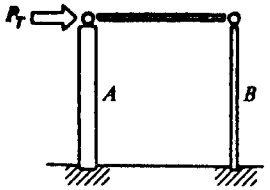


(d) Gaya aksial pada elemen tepi atas dan bawah bergantung pada besar momen lentur *overall* pada struktur. Jadi, gaya aksial di bagian tengah struktur lebih besar daripada di tepi.

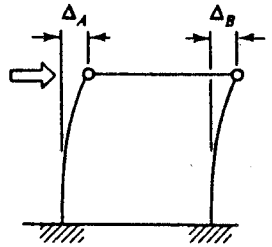


(e) Diagram ukuran elemen ditentukan berdasarkan momen lentur yang ada pada masing-masing elemen struktur.

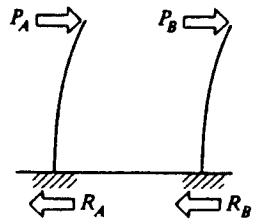
Gambar 9–8 Struktur *Vierebdeel:* jenis rangka khusus.



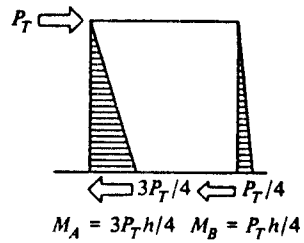
(a) **Struktur dengan kolom yang berbeda kekakuannya. Dalam hal ini misalkan $I_A = 3IB$.**



(b) Meskipun kekakuan kolom berbeda, translasi horizontal di kedua ujung balok harus sama ($\Delta_A = \Delta_B$).



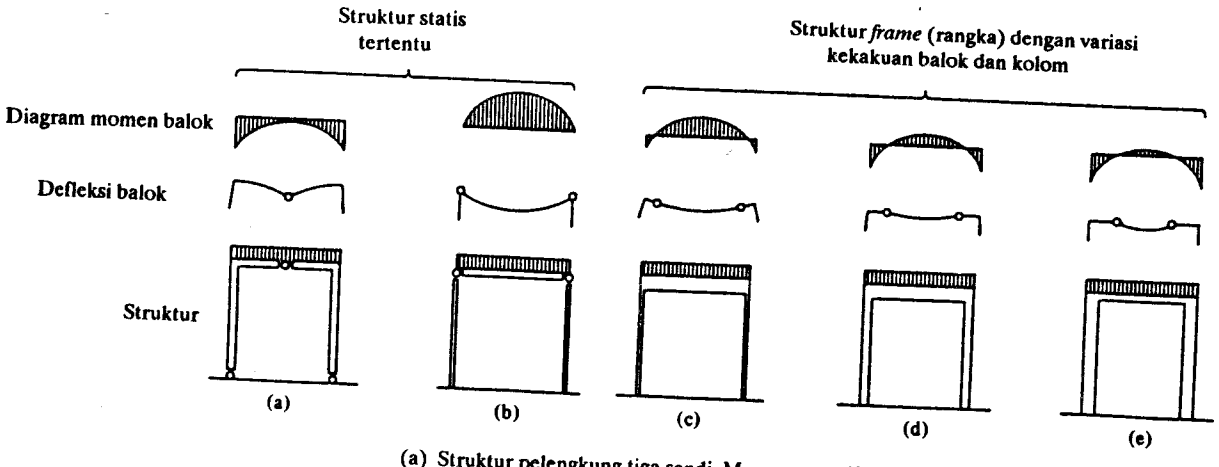
(c) Perlu ada gaya yang cukup besar yang harus diberikan pada kolom yang lebih kaku agar defleksinya sama. Oleh karena itu, haruslah $P_A > P_B$.



(d) Kolom yang lebih kaku memikul beban horizontal (jadi juga momen lentur) yang lebih besar dibandingkan dengan kolom yang kurang kaku.

GAMBAR 9–9
Efek perbedaan kekakuan kolom terhadap momen dan gaya pada struktur kaku.

Pentingnya memperhatikan karakteristik elemen struktur terlihat jelas pada Gambar 9–9. Apabila kita telah beranggapan bahwa satu kolom lebih kaku daripada kolom lainnya (misalnya I salah satu kolom lebih besar daripada I kolom lainnya), kolom yang lebih kaku akan memikul beban horizontal lebih besar daripada kolom yang kurang kaku. Oleh karena itu, kita tidak dapat menggunakan asumsi



(a) Struktur pelengkung tiga sendi. Momen negatif besar terjadi pada balok.
(b) Struktur *post-and-beam* : momen positif besar terjadi pada balok. Kolom tidak menahan rotasi pada ujung balok.
(c) Rangka dengan kolom sangat fleksibel dan balok sangat kaku. Kolom fleksibel hanya sedikit memberikan tahanan terhadap rotasi balok. Jadi, perilaku ujung balok akan seperti sendi.
(d) Rangka dengan kekakuan balok dan kolom yang normal. Kolom dapat memberikan tahanan rotasi (meskipun tidak penuh) terhadap ujung balok. Terjadi rotasi titik hubung.
(e) Rangka dengan kolom sangat kaku dan balok fleksibel. Kolom dapat memberikan tahanan rotasi yang cukup besar, sehingga dapat bersifat jepit terhadap ujung balok.
(f) Jumlah momen positif dan momen negatif pada balok tetap sama untuk semua kasus.

Gambar 9-10 Efek variasi kekakuan relatif balok dan kolom terhadap momen dan gaya internal pada struktur rangka kaku. Momen yang timbul akibat beban vertikal berubah sesuai dengan berubahnya lokasi titik belok. Semakin kaku suatu penampang pada rangka, semakin besar momen yang timbul pada penampang tersebut.

bahwa reaksi horizontal sama besar. Momen yang lebih besar akan timbul pada kolom yang memikul beban horizontal lebih besar, jadi pada kolom yang lebih kaku.

Adanya perbedaan kekakuan relatif antara balok dan kolom juga mempengaruhi momen akibat beban vertikal. Seperti terlihat pada Gambar 9–10, lokasi titik belok dipengaruhi oleh kekakuan relatif balok dan kolom. Semakin kaku kolom tersebut relatif terhadap balok, semakin besar tahanan terhadap putaran ujung balok. Sebagai akibatnya, momen yang timbul akan lebih besar daripada apabila kolomnya relatif kurang kaku terhadap balok. Untuk struktur yang kolomnya relatif lebih kaku dibandingkan dengan balok, momen negatif pada ujung balok yang bertemu dengan kolom kaku akan membesar sementara momen positifnya berkurang.

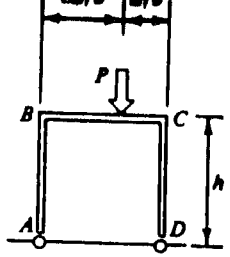
Metode analisis yang eksak tentu saja harus memperhatikan fenomena itu. Jadi, analisisnya harus melibatkan kekakuan balok maupun kolom. Meskipun tidak memperhatikan faktor kekakuan tersebut, analisis pendekatan yang diuraikan di atas masih sangat berguna untuk memberikan estimasi awal.

9.3.3 Goyangan (Sidesway)

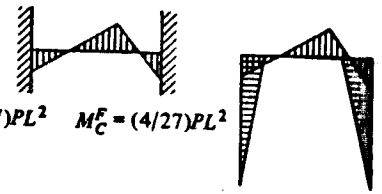
Pada rangka yang memikul beban vertikal ada fenomena yang disebut *goyangan (sideway)*. Apabila suatu rangka tidak berbentuk simetris, atau tidak dibebani simetris, struktur akan mengalami goyangan (translasi horizontal) ke salah satu sisi (ke kiri atau ke kanan rangka).

Alasan terjadinya goyangan dapat dilihat pada Gambar 9–11. Anggap bahwa kedua kolom sangat kaku sehingga benar-benar dapat mencegah rotasi ujung balok. Dengan demikian, balok pada rangka itu dapat dimodelkan bertumpuan jepit-jepit. Pada ujung balok akan timbul momen yang disebut *momen ujung jepit (fixed-end moments)* seperti terlihat pada Gambar 9–11(b). Karena titik hubung harus berada dalam keseimbangan, maka ujung atas kolom juga harus mendapat momen sama besar berlawanan arah dengan momen ujung jepit. Agar kolom berada dalam keseimbangan, adanya momen di ujung atas berarti juga harus ada reaksi horizontal di ujung bawah kolom. Besar gaya horizontal di ujung bawah masing-masing kolom sebanding dengan momen di ujung atas masing-masing kolom. Karena momen di ujung atas berbeda di kedua ujung atas kolom, maka gaya horizontal di ujung bawah kedua kolom juga berbeda. Akan tetapi, dengan meninjau keseimbangan horizontal keseluruhan struktur, kedua gaya horizontal di ujung bawah kedua kolom haruslah sama besar berlawanan arah, yang artinya juga momen di ujung atas kedua kolom harus sama. Hal ini dapat terjadi hanya jika rangka tersebut mengalami goyangan ke kiri. Pada saat rangka bergoyang ke kiri ada kecenderungan titik hubung kanan untuk sedikit "membuka" sudutnya, yang artinya mengurangi momen yang terjadi di titik hubung tersebut, jadi juga mengurangi gaya horizontal di ujung bawah kolom kanan. Sementara itu, di titik hubung kiri cenderung sedikit "menutup", yang artinya memperbesar momen di titik hubung itu sehingga gaya horizontal di ujung bawah kolom kiri berkurang. Goyangan yang terjadi harus sedemikian rupa sehingga kedua gaya horizontal itu sama besar.

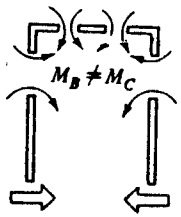
(a) Rangka kaku dengan beban tak simetris



(b) Momen pada rangka dengan anggapan bahwa tidak ada rotasi titik hubung

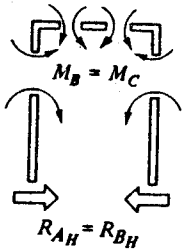


(c) Asumsi tidak adanya rotasi titik hubung menyebabkan gaya reaksi horizontal di kedua tumpuan tidak sama.

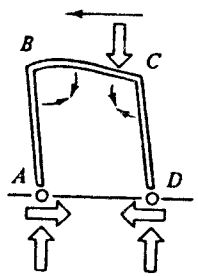


$(R_{A_H} = 2PL^2/27h) \neq (4PL^2/27h = R_{B_H})$

(d) Dari tinjauan horizontal rangka dalam arah horizontal, jelas bahwa (c) tidak dapat terjadi. Reaksi horizontal harus sama. Oleh karena itu, momen pada ujung atas kolom juga harus sama.



(e) Satu-satunya cara agar momen pada ujung atas kolom sama adalah dengan mengalami translasi (goyangan) ke kiri. Hal ini menyebabkan terjadinya kecenderungan menutup titik hubung kiri (yang berarti memperbesar momen lentur) dan membuka titik hubung kanan (yang berarti memperkecil momen lentur). Goyangan tersebut harus sedemikian rupa sehingga momen pada ujung atas kedua kolom sama.



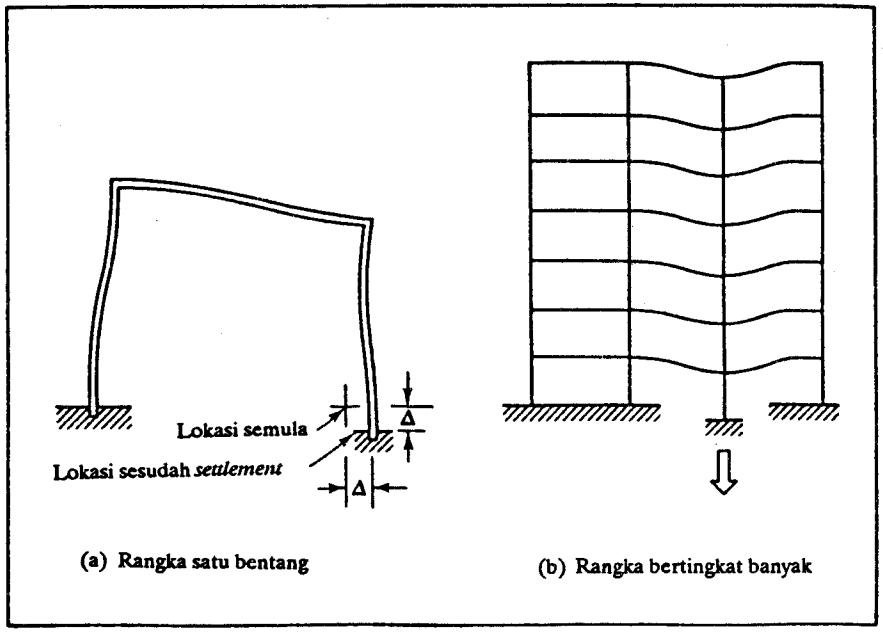
GAMBAR 9–11

Goyangan *(sidesway)* pada *rangka kaku.*

Beban atau dimensi tak simetrik pada struktur rangka dapat menyebabkan terjadinya goyangan horizontal pada struktur tersebut.

9.3.4 Turunnya Tumpuan (Support Settlements)

Seperti halnya pada balok menerus, rangka kaku sangat peka terhadap turunnya tumpuan. Perhatikan rangka kaku yang terlihat pada Gambar 9–12(a). Berbagai jenis gerakan tumpuan (vertikal, horizontal, maupun rotasional) dapat menimbulkan momen pada rangka kaku. Semakin besar *differential setlement*, akan semakin besar pula momen yang ditimbulkannya. Apabila gerakan tumpuan ini tidak diantisipasi sebelumnya, momen tersebut dapat menyebabkan keruntuhan pada rangka. Karena itulah kita harus benar-benar memperhatikan desain fondasi struktur rangka kaku untuk memperkecil kemungkinan terjadinya gerakan tumpuan.



GAMBAR 9–12

efek turunnya tumpuan *(support settlements)* pada struktur rangka kaku. Karena adanya perbedaan penurunan tumpuan, pada rangka dapat terjadi kelengkungan, jadi juga terjadi momen lentur.

9.3.5 Efek Kondisi Pembebanan Sebagian

Seperti yang terjadi pada balok menerus, momen maksimum yang terjadi pada struktur rangka bukan terjadi pada saat rangka itu dibebani penuh, melainkan pada saat dibebani sebagian. Tentu saja hal ini sangat menyulitkan proses analisisnya. Masalah pertama yang timbul adalah masalah prediksi kondisi beban bagaimanakah yang menghasilkan momen kritis. Analisisnya hanya dapat dilakukan setelah kita menentukan prediksi tersebut. Ada berbagai cara untuk menentukan prediksi itu secara eksak (misalnya cara Miller-Breslau). Sayangnya, penentuan kondisi pembenahan sebagian pada rangka tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini.

9.4 DESAIN RANGKA KAKU

9.4.1 Pendahuluan

Desain struktur rangka adalah proses yang tidak mudah. Salah satu petanyaan yang dapat muncul adalah apakah penggunaan rangka dapat memberikan manfaat atau tidak. Sebagai contoh, struktur rangka adalah jenis struktur yang tidak efisien apabila digunakan untuk beban lateral yang sangat besar. Untuk memikul beban demikian, cara efisien yang dapat dilakukan adalah dengan menambahkan *shear wall* (dinding geser) atau *diagonal bracing* (pengekang diagonal) pada struktur rangka.

Apabila persyaratan fungsional suatu gedung mengharuskan penggunaan rangka, maka dimensi dan geometri umum rangka yang akan didesain pada umumnya sudah pasti, dan masalah desain selanjutnya lebih terpusatkan pada penentuan titik hubung, jenis material, dan ukuran penampang elemen struktur. Berikut ini akan dibahas cara menentukan ukuran penampang. Proses mendesain elemen struktur pada rangka serupa dengan desain elemen lentur pada umumnya. Langkah sulit yang timbul adalah penentuan gaya geser, gaya aksial, dan momen lentur internal maksimum (atau kritis) pada elemen struktur. Setelah langkah itu dilakukan, penentuan ukuran penampang dapat ditentukan dengan cara-cara yang telah dibahas pada Bab 6.

9.4.2 Momen Desain

Rangka yang dipakai pada gedung pada umumnya memikul beban vertikal dan beban lateral. Kadang-kadang kita juga menggunakan elemen struktural tambahan untuk memikul beban lateral. Untuk situasi dimana rangka dipandang memikul kedua jenis beban tersebut, tentu saja elemen struktur yang digunakan harus mempunyai kapasitas cukup untuk menahan momen yang ditimbulkan oleh kombinasi beban-beban itu.

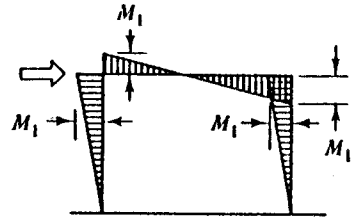
Pada Bab 9.4.1 kita telah membahas analisis rangka yang dibebani vertikal maupun lateral. Untuk menentukan momen desain, kita harus menggabungkan momen yang diakibatkan oleh kedua jenis beban itu . Pada Gambar 9–13 diperlihatkan proses penggabungan tersebut untuk struktur rangka sederhana. Di beberapa bagian struktur, momen-momen itu saling menambahkan sementara di bagian lain saling mengurangi. Momen kritis terjadi apabila momen akibat beban vertikal saling menambahkan dengan momen akibat beban lateral. Perlu diingat bahwa beban lateral pada umumnya dapat bekerja dalam arah bolak-balik. Dengan demikian, untuk keperluan desain, kita dapat menggabungkan momen-momen tersebut dengan cara menjumlahkannya.

Dalam hal beban lateral sangat besar dibandingkan dengan beban vertikal, momen yang diakibatkan oleh beban lateral akan dominan sehingga momen desain pada titik hubung (joints) juga besar. Apabila beban lateral tidak dominan, maka momen desain kritis pada balok akan terjadi di bagian tengah bentangnya (tidak selalu tepat di tengah). Pada kolom, momen kritisnya hampir selalu terjadi di titik ujung.

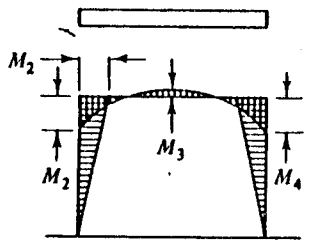
Pembahasan di atas tidak dimaksudkan untuk mempersulit masalah penentuan beban parsial yang dapat memberikan momen terbesar. Kita dapat saja melakukan analisis untuk beban sebagian tersebut, tetapi hal ini terlalu eksak untuk maksud desain perencanaa, jadi jarang dilakukan orang. Sehubungan dengan hal ini, pembahasan pada Bab 8.4.2 mengenai momen desin cukup relevan untuk dipelajari. Untuk keperluan desain, momen pendekatan yang diberikan pada Tabel 8–1, yang cukup merefleksikan efek pembebanan lateral, sering dipakai pada rangka, bukan hanya pada balok menerus.

Meskipun peninjauan lebih lanjut mengenai efek beban sebagian pada rangka merupakan hal yang sangat penting, dalam buku ini kita tidak membahasnya lebih dalam. Pembahasan pada buku ini dipusatkan pada pembahasan rangka untuk kondisi pembebanan utama saja. Sering terjadi, efek pembebanan parsial (sebagian) hanya ditinjau sesudah struktur dirancang terhadap pembebanan utama.

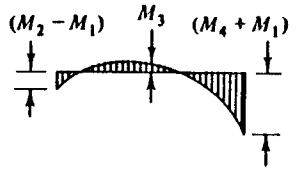
(a) Momen akibat gaya lateral



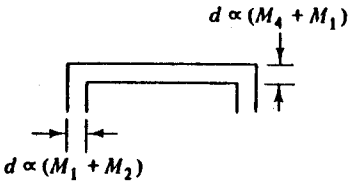
(b) Momen akibat gaya vertikal



(d) Elemen struktur yang diinginkan mempunyai tinggi konstan diberi ukuran konstan diberi ukuran sesuai dengan momen akibat kombinasi beban lateral dan vertikal yang terjadi



(c) Momen pada balok akibat adanya beban lateral dan vertikal secara simultan



GAMBAR 9–13
Momen desain kritis pada rangka satu bentang.

Apabila momen maksimum kritis telah diperoleh, juga gaya aksial dan geser internal, penentuan ukuran penampang elemen struktur dapat dilakukan. Ada dua pilihan untuk melakukan hal ini. Yang pertama adalah mengidentifikasi momen dan gaya internal maksimum yang ada di bagian elemen struktur, kemudian menentukan ukuran penampang di seluruh elemen tersebut berdasarkan gaya dan momen internal tadi sehingga ukuran penampang konstan di seluruh panjang elemen struktur tersebut. Hal ini berarti bahwa elemen struktur akan berukuran-lebih (oversized) di seluruh bagian elemen struktur kecuali di titik kritis. Pilihan kedua adalah menentukan bentuk penampang sebagai respons terhadap variasi gaya dan momen kritis.

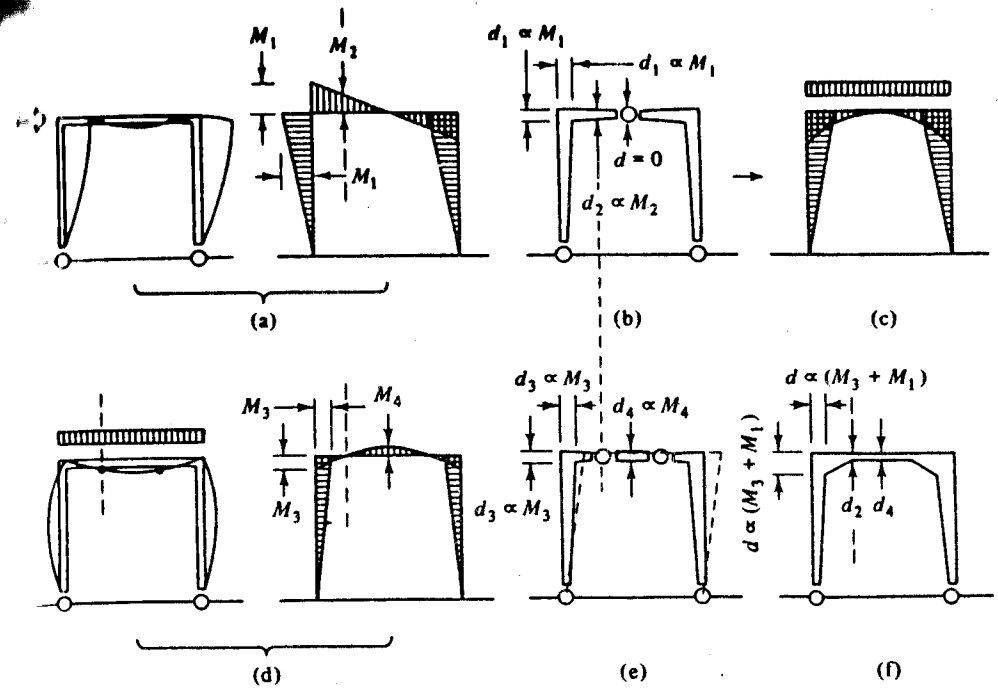
Penentukan ukuran elemen struktur bertinggi konstan telah dibahas pada Bab 6. Implikasi pilihan kedua dalam mendesain elemen struktur rangka diuraikan berikut ini.

9.4.3 Penentuan Bentuk Rangka

Struktur Satu Bentang. Seperti telah disebutkan terdahulu pada desain balok, ukuran dan bentuk elemen struktur pada struktur rangka dapat ditentukan berdasarkan responnya terhadap distribusi gaya dan momen internal yang ada pada elemen struktur tersebut. Sekalipun penentuan ukuran dengan cara demikian tidak praktis ditinjau dari segi pelaksanaan, kita perlu juga meninjau masalah itu untuk lebih memahami hal-hal yang berkaitan dalam desain rangka.

Perhatikan struktur rangka yang terlihat pada Gambar 9–14. Rangka ini sama dengan rangka yang telah dianalisis pada Bab 9.3.1. Apabila tinggi elemen struktur didesain menurut besar momen yang terjadi di masing-masing penampang (jadi, untuk sementara kita abaikan pengaruh gaya internal lainnya), dan tidak ada penyimpangan dari hal ini, maka akan diperoleh konfigurasi seperti terlihat pada Gambar 9–14 untuk setiap kondisi pembebanan yang kita tinjau. Karena jenis momen yang diakibatkan oleh beban vertikal, maka bentuk struktur yang diperoleh juga sangat berbeda.

Kita perlu meninjau struktur rangka yang telah didesain berdasarkan satu jenis pembebanan, dan rangka itu mengalami kondisi pembebanan lainnya karena hal ini sering terjadi pada struktur gedung aktual. Struktur yang telah didesain menurut beban lateral harus dapat juga memikul beban vertikal. Menarik untuk dicatat bahwa struktur ini mempunyai bentuk serupa dengan pelengkung tiga sendi yang telah kita bahas pada Bab 5. Apabila beban vertikal bekerja pada struktur tersebut, akan timbul momen seperti terlihat pada Gambar 9–14(c). Selanjutnya struktur itu didesain terhadap efek kombinasi momen akibat beban vertikal dan beban lateral. Tentunya kita ingin mengetahui apakah dengan cara demikian kita memperoleh struktur rangka yang efisien. Dengan membandingkan besar momen akibat beban vertikal pada jenis struktur pelengkung tiga sendi dengan momen yang timbul pada struktur (yang semula) dua sendi [lihat Gambar 9–14(d)], jawabnya jelas: tidak. Penyelipan suatu sendi pada balok (yang ditentukan berdasarkan beban lateral) akan menyebabkan terjadinya distribusi momen yang tak diinginkan pada balok karena momen ini jauh lebih besar daripada yang ada pada rangka dua sendi. Akibat besarnya momen tersebut, ukuran penampang yang diperlukan juga akan jauh lebih besar.



(a) Rangka yang memikul beban lateral

(b) Respons struktural terhadap momen akibat beban lateral

(c) Momen pada rangka (b) akibat beban vertikal. Momen ini lebih besar daripada yang terjadi pada rangka (d).

(d) Rangka yang memikul beban vertikal

(e) Respons struktur terhadap momen akibat beban vertikal. Rangka ini adalah struktur empat sendi dan tidak stabil, jadi tidak dapat digunakan.

(f) Respons struktural terhadap beban vertikal dan lateral. Struktur ini diberi ukuran berdasarkan kondisi beban vertikal dan lateral, tetapi tidak optimum untuk kedua kondisi.

GAMBAR 9–14
Penentuan bentuk dan ukuran elemen struktur berdasarkan atas responnya terhadap momen internal.

Apabila penggunaan respons terhadap beban lateral ini sebagai langkah penentu awal dalam desain tidak menghasilkan struktur yang efisien, maka kita dapat menggunakan strategi lain, yaitu dengan menggunakan cara sebaliknya. Sebagai penentu awal adalah beban vertikal. Akan tetapi, dengan cara ini terlihat bahwa pada struktur itu akan diperoleh empat sendi, yang jelas menyebabkan struktur menjadi tidak stabil. Oleh karena itu, perlu dilakukan langkah lain.

Pilihan yang dapat kita ambil adalah menentukan ukuran (dan bentuk) penampang berdasarkan momen negatif dan positif maksimum yang mungkin terjadi di setiap penampang akibat kedua jenis pembebanan tersebut. Konfigurasi struktur rangka yang akan diperoleh dari cara ini adalah seperti yang terlihat pada Gambar

9–14(f). Konfigurasi demikian tidak optimum untuk kondisi beban lateral maupun kondisi beban vertikal, tetapi dapat memenuhi kondisi simultan kedua jenis pembebanan tersebut.

Rangka yang terlihat pada Gambar 9–14(f) menunjukkan karakteristik kebanyakan desain rangka. Di sekitar titik hubung sering dilakukan pembesaran penampang (atau penguatan) yang merefleksikan fakta bahwa momen di bagian itu lebih besar dibandingkan dengan pada bagian lain.

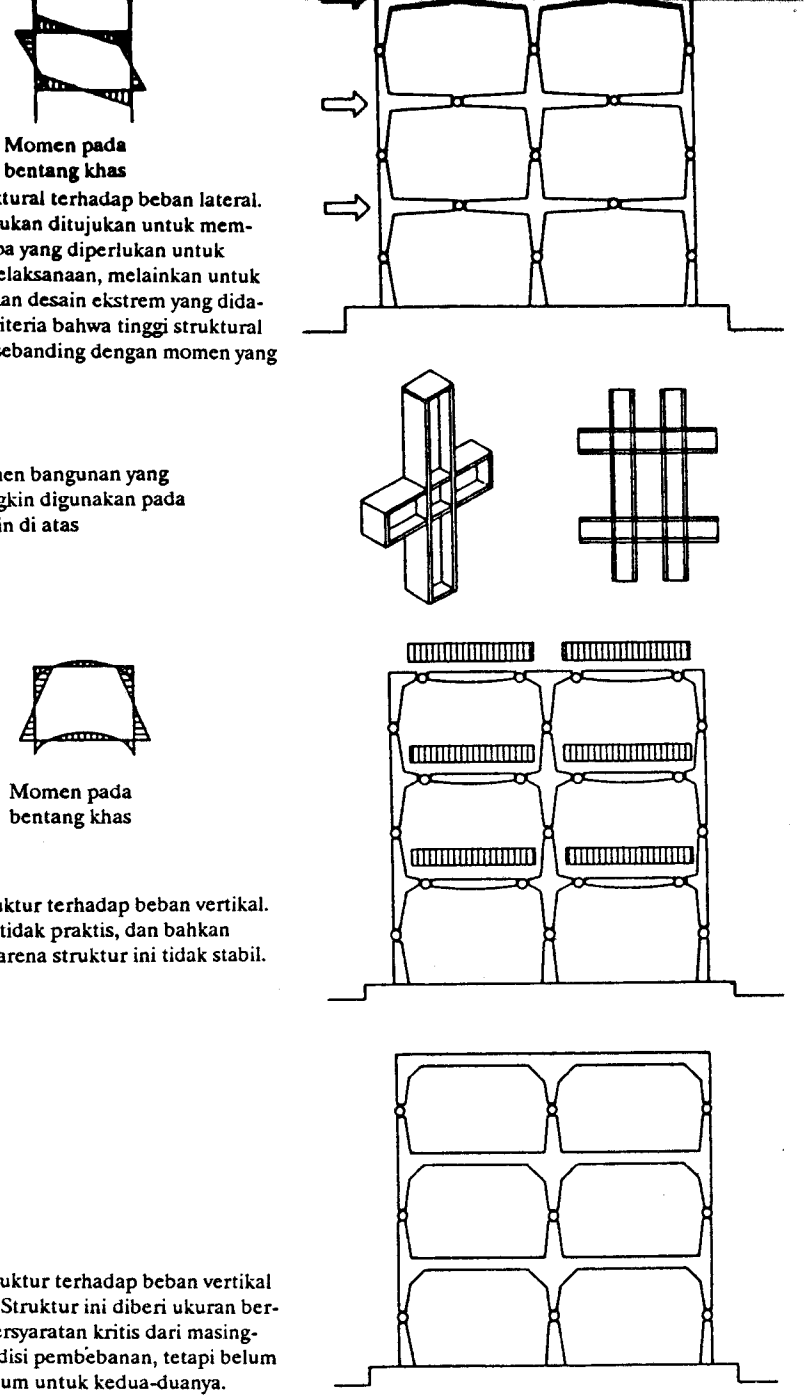
Rangka Bertingkat Banyak. Pada struktur rangka bertingkat banyak juga terjadi hal hal yang sama dengan yang terjadi pada struktur rangka berbentang tunggal (Gambar 9–15). Pada struktur ini desainnya pun tidak optimum untuk masing-masing kondisi pembebanan, tetapi mampu memikul kombinasi beban-beban tersebut.

9.4.4 Kondisi Ujung

Tinjauan desain yang tidak kalah pentingnya adalah penentuan kondisi ujung, apakah berupa jepit ataukah berupa sendi.

Pada Gambar 9–16(a)–(d) diperlihatkan empat struktur berbentang satu yang semuanya identik kecuali kondisi ujung elemen-elemen strukturnya. Diagram momen akibat beban lateral yang digambarkan ditentukan dengan menggunakan metode yang telah dibahas terdahulu. Jelaslah bahwa beban lateral yang sama menimbulkan momen yang berbeda-beda untuk keempat struktur tersebut. Distribusi momen, lokasi momen maksimum, serta besar momen maksimum berbeda-beda untuk keempat struktur itu. Gambar 9–16 juga memperlihatkan respons struktural yang didasarkan atas diagram momen yang diperoleh.

Dengan membandingkan diagram momen tersebut, terlihat jelas bahwa momen yang lebih besar terjadi pada beberapa rangka dibandingkan dengan pada rangka lainnya. Pada Gambar 9–16(b) terlihat bahwa momen maksimum pada kolom sama besar dengan yang terjadi pada Gambar 9–16(c) (rangka *table-top)* sementara pada Gambar 9–16(b) tidak terjadi momen balok sama sekali. Pada kolom di dalam Gambar 9–16(c) juga ada gaya aksial. Jelas bahwa desain kolom untuk Gambar 9–16(c) akan memerlukan material lebih banyak daripada desain kolom pada Gambar 9–16(b). Akan tetapi, agar ujung bawah kolom pada Gambar 9–16(b) dapat bersifat jepit, diperlukan fondasi yang mampu memikul momen penjepitan. Hal ini tentu saja memerlukan material tambahan pada fondasi dibandingkan dengan yang diperlukan pada Gambar 9–16(c). Perhatikan pula rangka berhubungan kaku dan mempunyai titik tumpu jepit pada Gambar 9–16(d). Momen maksimum yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan dua struktur yang telah kita tinjau [Gambar 9–16(b) dan Gambar 9–16(c)]. Perhatikan bahwa jumlah absolut momen kolom positif dan negatif (di ujung atas dan ujung bawah) pada Gambar 9–16(d) sama dengan momen maksimum yang terjadi pada kedua contoh sebelumnya. Jadi, momen totalnya sama untuk semua kasus, tetapi distribusinya berubah, bergantung pada jenis kondisi ujung yang ada.

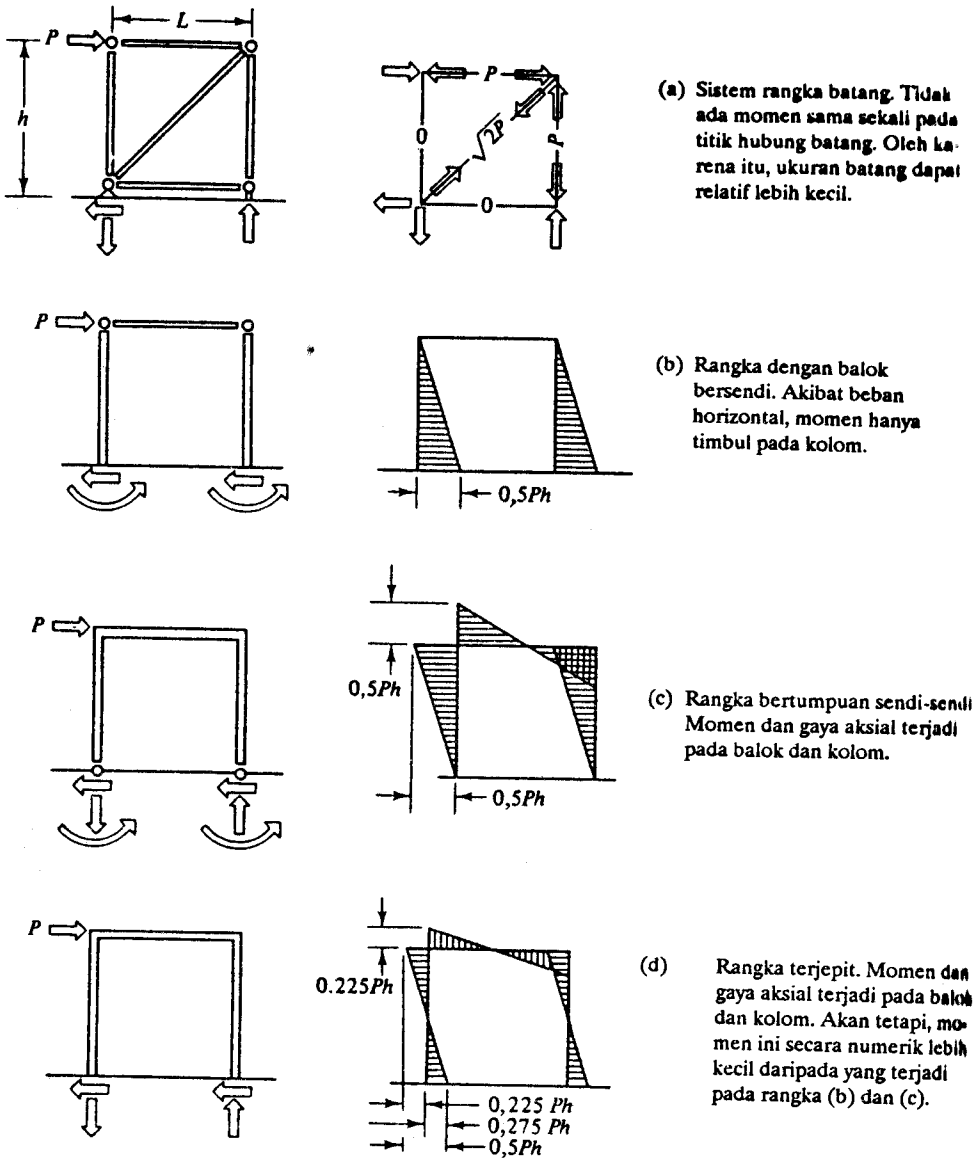


(a) Respons struktural terhadap beban lateral. Diagram ini bukan ditujukan untuk memperlihatkan apa yang diperlukan untuk kepraktisan pelaksanaan, melainkan untuk memperlihatkan desain ekstrem yang didasarkan atas kriteria bahwa tinggi struktural dapat dibuat sebanding dengan momen yang ada.

(b) Respons struktur terhadap beban vertikal. Hal ini jelas tidak praktis, dan bahkan berbahaya karena struktur ini tidak stabil.

(c) Respons struktur terhadap beban vertikal dan lateral. Struktur ini diberi ukuran berdasarkan persyaratan kritis dari masing-masing kondisi pembebanan, tetapi belum tentu optimum untuk kedua-duanya.

GAMBAR 9–15
Penentuan ukuran dan bentuk penampang pada rangka bertingkat banyak berdasarkan momen internal.



(a) Sistem rangka batang. Tidak ada momen sama sekali pada titik hubung batang. Oleh karena itu, ukuran batang dapat relatif lebih kecil.

(b) Rangka dengan balok bersendi. Akibat beban horizontal, momen hanya timbul pada kolom.

(c) Rangka bertumpuan sendi-sendi Momen dan gaya aksial terjadi pada balok dan kolom.

(d) Rangka terjepit. Momen dan gaya aksial terjadi pada balok dan kolom. Akan tetapi, momen ini secara numerik lebih kecil daripada yang terjadi pada rangka (b) dan (c).

GAMBAR 9–16
Efek kondisi ujung terhadap momen pada struktur rangka kaku satu bentang.

Apabila semua faktor, termasuk juga beban vertikal, ditinjau, maka rangka kaku pada Gambar 9–16(d) merupakan jenis struktur yang paling menguntungkan ditinjau dari efisiensi struktural. Akan tetapi, dalam hal desain fondasi merupakan masalah, penggunaan tumpuan sendi seperti terlihat pada Gambar 9–16(c) mungkin saja merupakan pilihan terbaik. Momen yang diakibatkan oleh turunnya tumpuan pada rangka yang mempunyai tumpuan sendi akan lebih kecil daripada yang terjadi pada rangka bertumpuan jepit. Selain itu, fondasi untuk rangka bertumpuan sendi tidak perlu mempunyai kemampuan memikul momen. Gaya dorong horizontal (akibat beban vertikal) juga biasanya lebih kecil pada rangka bertumpuan sendi dibandingkan dengan yang bertumpuan jepit. Akan tetapi, kita perlu ingat bahwa rangka bertumpuan jepit dapat memberikan keuntungan meminimumkan momen dan mengurangi defleksi dibandingkan rangka bertumpuan sendi. Dengan demikian, dalam desain kita perlu meninjau berbagai kemungkinan agar diperoleh hasil yang benar-benar diinginkan.

9.4.5 Tinjauan Umum

Sebagaimana telah diuraikan terdahulu, kita perlu memberikan perhatian khusus, apakah struktur rangka merupakan pilihan terbaik untuk suatu maksud fungsional yang kita inginkan atau tidak. Gambar 9–16 menunjukkan bahwa struktur yang menggunakan hubungan sendi dan pengekang (bracing) diagonal (struktur ini pada dasarnya adalah rangka batang) kadang-kadang merupakan struktur yang paling efisien (berdasarkan banyak material yang diperlukan untuk memikul beban). Untuk kondisi beban itu saja, bentuk rangka batang jelas paling efisien; kita tidak perlu menggunakan struktur rangka kaku.

Dalam banyak hal, di mana rangka dipandang sebagai struktur yang layak dan perlu digunakan (karena terbukanya), kita dapat saja menggunakan *braced-frame* (rangka dengan menggunakan pengekang) di mana rangka diperkaku oleh elemen struktur diagonal. Adanya batang diagonal ini tidak boleh mengganggu fungsi (penggunaan ruang) rangka tersebut (lihat Bab 4). Lokasi yang umum dipilih adalah di dekat lubang *elevator* atau di lokasi lain yang memang dikehendaki tertutup. Penggunaan elemen struktur diagonal ini sangat mengurangi momen lentur pada rangka yang diakibatkan oleh beban lateral. Dengan demikian, elemen struktur rangka dapat mempunyai ukuran yang lebih kecil.

SOAL

9–1. Diskusikanlah secara rinci perkembangan riwayat metode kuantitatif dalam analisis struktur rangka. Carilah literatur lain.

9–2. Carilah gedung yang menggunakan rangka yang masih dalam tahap pelaksanaan. Gambarlah hubungan balok dan kolom yang ada pada rangka tersebut.

9–3. Suatu struktur rangka satu bentang seperti terlihat pada Gambar 9–4 memikul beban horizontal 3000 lb di titik hubung kiri. Anggap bahwa h = 12 ft dan L = 22 ft. Gambarlah diagram momen dan geser yang terjadi. Tunjukkanlah nilai numerik pada diagram tersebut.

9–4. Suatu rangka satu bentang seperti terlihat pada Gambar 9–5 memikul beban horizontal 5000 lb di titik hubung kiri. Anggap bahwa h = 15 ft dan L = 25 ft. Gambarlah diagram momen dan geser yang terjadi. Tunjukkanlah nilai numerik pada diagram tersebut.

9–5. Gambarlah sketsa yang mengilustrasikan variasi ukuran struktur (di sepanjang sketsa Gambar 9–14 dan 9–15) untuk rangka yang dianalisis pada Soal 9–3.

9–6. Tinjaulah dua struktur satu bentang yang terlihat pada Gambar 9–16(c) dan (d). Anggap bahwa kedua struktur tersebut identik dalam segala hal kecuali kondisi ujungnya. Anggap pula keduanya memikul beban identik. Struktur manakah yang akan mengalami defleksi horizontal lebih besar? Jelaskan jawaban tersebut.

9–7. Ulangi Soal 9–6 untuk struktur rangka yang terlihat pada Gambar 9–16(b) dan 9–16(c).

Bab 10

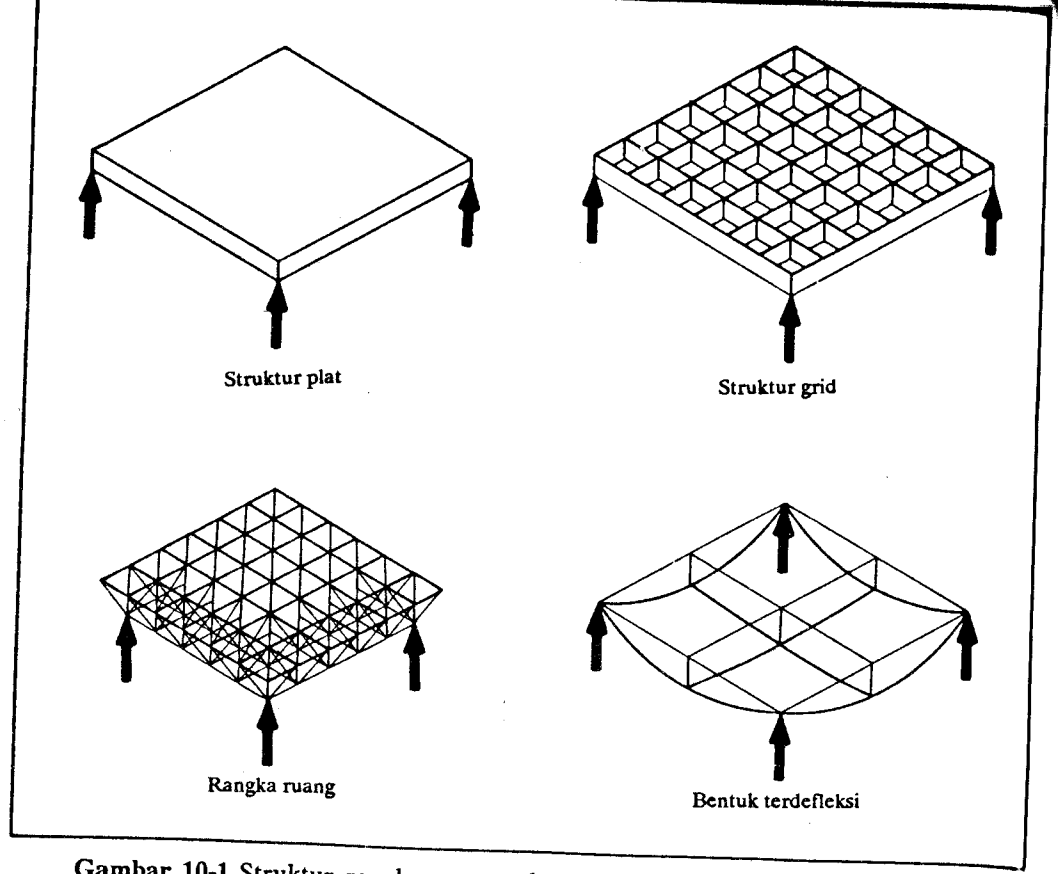
STRUKTUR GRID DAN PLAT

10.1 PENDAHULUAN

Plat adalah struktur planar kaku yang secara khas terbuat dari material monolit yang tingginya kecil dibandingkan dengan dimensi-dimensi lainnya. Beban yang umum bekerja pada plat mempunyai sifat banyak arah dan tersebar. Sejak digunakannya beton bertulang modern untuk plat, hampir semua gedung menggunakan material ini sebagai elemen plat.

Plat dapat ditumpu di seluruh tepinya, atau hanya pada titik-titik tertentu (misalnya oleh kolom-kolom), atau campuran antara tumpuan menerus dan titik. Kondisi tumpuan dapat sederhana atau jepit. Adanya kemungkinan variasi kondisi tumpuan menyebabkan plat dapat digunakan untuk berbagai keadaan.

Pada umumnya dapat dikatakan bahwa plat yang terbuat dari material padat homogen mempunyai sifat sama di segala arah. Sekalipun demikian, ada pula jenis elemen lain yang mempunyai perilaku struktural analog dengan yang dimiliki oleh plat seperti terlihat pada Gambar 10–1. *Rangka ruang* (sebenarnya lebih tepat disebut rangka batang) yang terdiri atas elemen-elemen pendek kaku berpola segitiga secara tiga dimensi dan membentuk struktur permukaan bidang kaku besar dengan ketebalan relatif tipis adalah contoh struktur yang analog dengan plat. *Struktur grid* juga merupakan contoh lainnya. Struktur grid bidang secara khas terdiri atas elemen-elemen linear kaku panjang seperti balok atau rangka batang, yang batang-batang tepi atas dan bawahnya sejajar. Titik hubungnya bersifat kaku. Distribusi momen dan geser pada struktur seperti ini dapat merupakan distribusi yang terjadi pada plat-plat monolit. Akan tetapi, ada juga perbedaan-perbedaan dasar yang akan dijelaskan pada bab ini.



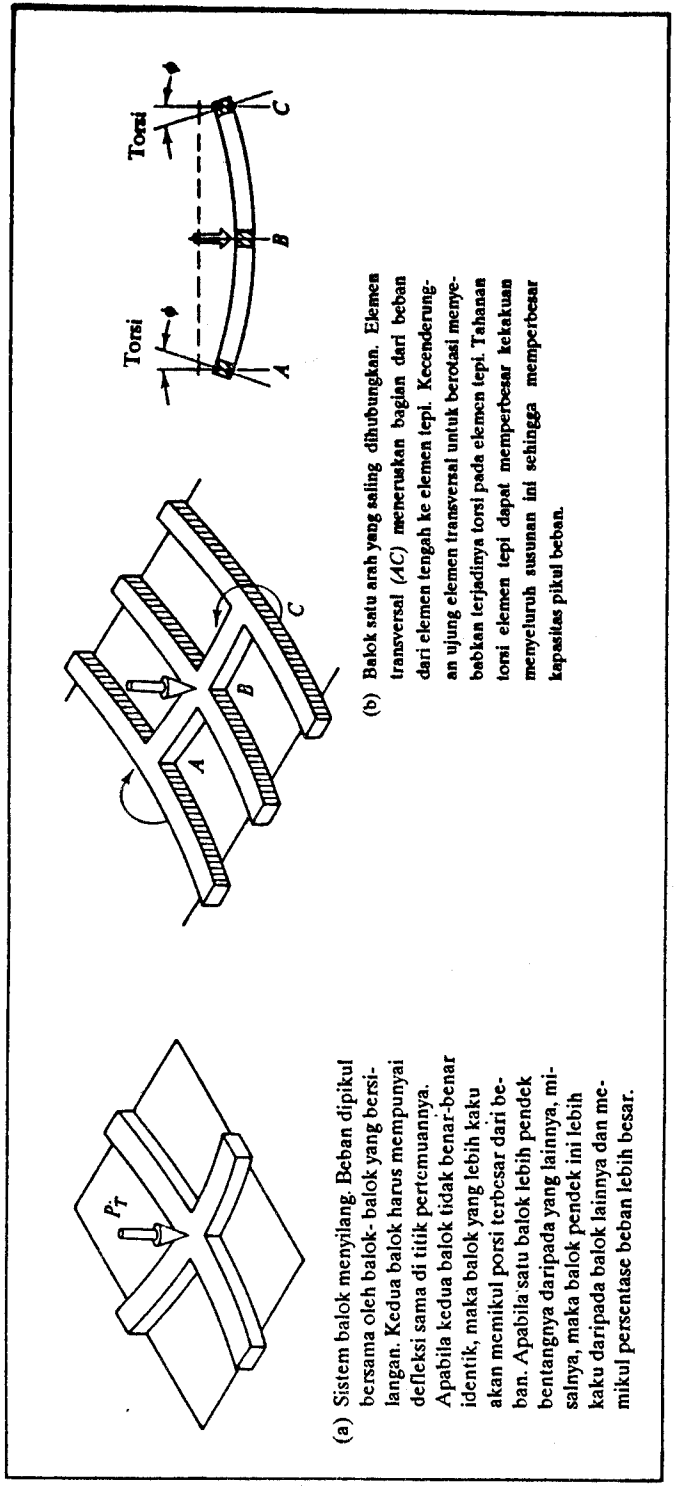
Gambar 10-1 Struktur rangka ruang, plat, dan grid. Jenis umum kelengkungan dan momen eksternal yang timbul pada struktur plat, grid, dan rangka ruang pada dasarnya sama apabila dimensi umumnya sama. Cara sebenarnya masing-masing struktur memberikan momen internal tahanan dan perilaku khususnya, bagaimana pun, berbeda.

Pada umumnya, grid *berbutir kasar* lebih baik dalam memikul sederetan beban terpusat, sedangkan plat dan rangka ruang (dengan banyak elemen struktur kecil) cenderung lebih cocok untuk memikul beban terdistribusi merata.

10.2 PRINSIP–PRINSIP UMUM

10.2.1 GRID

Kita akan dapat lebih mudah memahami perilaku struktur plat dengan meninjau terlebih dulu grid sederhana. Perhatikan sistem balok melintang sederhana yang ditumpu pada keempat sisinya seperti terlihat pada Gambar 10–2(a). Jelas bahwa



(b) Balok satu arah yang saling dihubungkan. Elemen transversal (*AC*) meneruskan bagian dari beban dari elemen tengah ke elemen tepi. Kecenderungan ujung elemen transversal untuk berotasi menyebabkan terjadinya torsi pada elemen tepi. Tahanan torsi elemen tepi dapat memperbesar kekakuan menyeluruh susunan ini sehingga memperbesar kapasitas pikul beban.

(a) Sistem balok menyilang. Beban dipikul bersama oleh balok- balok yang bersilangan. Kedua balok harus mempunyai defleksi sama di titik pertemuannya. Apabila kedua balok tidak benar-benar identik, maka balok yang lebih kaku akan memikul porsi terbesar dari beban. Apabila satu balok lebih pendek bentangnya daripada yang lainnya, misalnya, maka balok pendek ini lebih kaku daripada balok lainnya dan memikul persentase beban lebih besar.

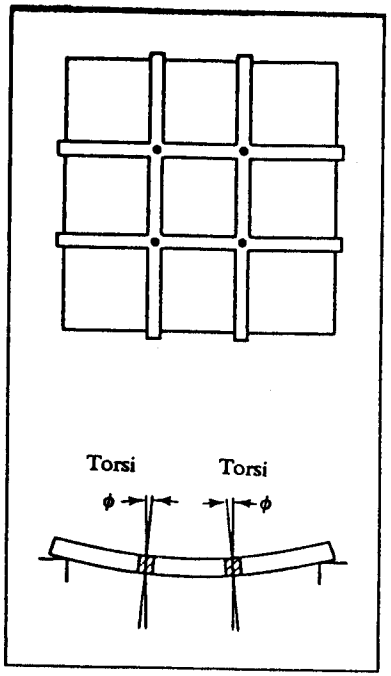
Gambar 10-2 Struktur grid sederhana

selama baloknya benar-benar identik, beban akan sama di sepanjang kedua ha
(setiap balok akan memikul setengah dari beban total dan meneruskan ke tumpuan
nya). Apabila balok-balok tersebut tidak identik, maka bagian besar dari beban akan
dipikul oleh balok yang lebih kaku. Apabila, misalnya, balok mempunyai panjang
tidak sama, maka balok yang lebih pendek akan menerima bagian beban lebih besar
dibandingkan dengan yang diterima oleh balok panjang karena balok ini lebih kaku.
Kedua balok itu tentu saja akan mengalami defleksi yang sama di titik pertemuan
nya karena kedua-duanya dihubungkan pada titik tersebut. Agar defleksi kedua balok
itu sama, maka diperlukan gaya lebih besar pada balok yang lebih pendek. Dengan
demikian, balok yang lebih pendek akan memikul bagian beban yang lebih besar.
Hal ini akan ditinjau kembali pada saat kita membahas analisisnya pada bagian lain
bab ini. Yang penting diingat di sini adalah bahwa besar relatif dari beban yang di
pikul pada sistem grid yang saling tegak lurus, bergantung pada sifat fisis dan dimensi
elemen-elemen grid tersebut.

Perhatikan grid sederhana lain, yang sekarang berupa sistem satu arah seperti
terlihat pada Gambar 10–2(b). Pada saat balok tersebut mengalami defleksi akibat
beban yang bekerja padanya, balok transversal meneruskan beban tersebut ke elemen
longitudinal lain. Dengan hanya meninjau geometri bentuk balok terdefleksi, kita
akan dengan mudah dapat melihat bahwa elemen struktur longitudinal tengah
memikul bagian lebih besar dari beban dibandingkan dengan elemen-elemen luar
(elemen struktur tengah melendut lebih besar, yang berarti bahwa elemen ini
memikul momen lebih besar). Bagaimana pun, memang semua elemen grid tersebut
memikul beban. Pada sistem balok sederhana, hanya balok yang dibebani langsung
saja yang memikul beban, tidak diteruskan ke balok lainnya.

Aspek lain yang menarik mengenai grid satu arah adalah terjadinya torsi pada
elemen struktur eksterior yang diberikan oleh elemen struktur transversal. Karena
elemen transversal mengalami defleksi, maka ujung-ujungnya akan berotasi.
Kecenderungan berotasi ini dapat menyebabkan terjadinya torsi pada elemen
struktur eksterior. Pada saat yang sama, elemen struktur tersebut memberikan
tahanan torsional terhadap rotasi ujung elemen transversal. Sebagai akibatnya,
elemen transversal itu menjadi diperkaku oleh efek tahanan torsional elemen
eksterior, yang berarti mengurangi defleksi. Dengan demikian, efek akhir yang
terjadi ialah adanya bagian beban yang dipikul oleh elemen eksterior sebagai aksi
torsi. Jadi, partisipasi elemen grid akan lebih besar dengan adanya aksi torsi tersebut.
Kekakuan grid secara menyeluruh juga meningkat.

Pada grid yang lebih kompleks, seperti terlihat pada Gambar 10–3, baik aksi
dua arah maupun torsi terjadi. Semua elemen berpartisipasi dalam memikul beban
dengan memberikan kombinasi kekuatan lentur dan kekuatan torsinya. Perhatikan bahwa apabila balok-balok tersebut terletak sederhana dan tidak saling berhubungan secara kaku, rotasi lentur satu elemen struktur tidak dapat menimbulkan torsi pada elemen struktur lainnya. Sebagai akibatnya, tidak ada penambahan kekakuan menyeluruh yang dapat diberikan dengan aksi torsi. Jadi, jelaslah bahwa defleksi pada struktur grid yang terhubung secara kaku akan lebih kecil dibandingkan dengan pada struktur grid yang terhubung secara sederhana.



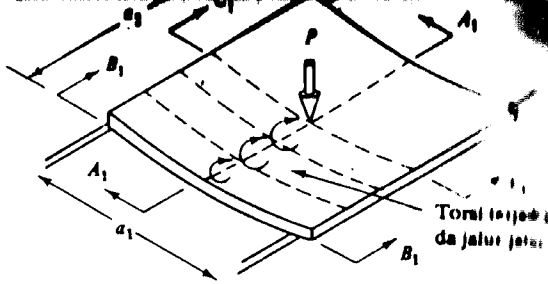
Gambar 10-3 Perilaku struktur grid kompleks. Torsi terjadi pada semua elemen struktur sebagai akibat dari cara struktur tersebut berdefleksi. Tahanan torsi pada elemen struktur yang diasosiasikan dengan hal tersebut memperbesar kekakuan grid secara menyeluruh.

10.2.2 Plat

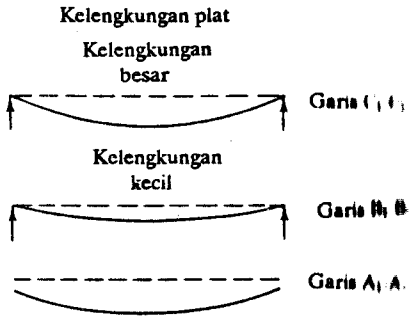
Struktur plat mempunyai sifat hampir sama dengan struktur grid yang disebutkan di atas. Perbedaan yang nyata adalah bahwa pada plat, berbagai aksi yang disebutkan di atas terjadi secara kontinu di seluruh bentang plat, tidak hanya pada titik-titik tertentu.

Perhatikan plat satu arah sederhana yang terlihat pada Gambar 10–4. Plat itu dapat *dibayangkan* sebagai sederetan jalur balok yang berhubungan di seluruh panjangnya. Pada saat beban dipikul oleh satu jalur balok, maka ada kecenderungan untuk berdefleksi ke bawah. Akan tetapi, jalur balok di sebelahnya cenderung menahan kecenderungan tersebut, yang berarti balok ini memikul juga bagian dari beban itu. Tentu saja akan timbul gaya geser pada pertemuan antara balok-balok yang bersebelahan. Untuk balok yang semakin jauh dari posisi beban yang bekerja, torsi dan gaya geser yang timbul akan lebih kecil karena sudah semakin banyak bagian beban yang diteruskan ke tumpuan oleh aksi longitudinal jalur-jalur tersebut.

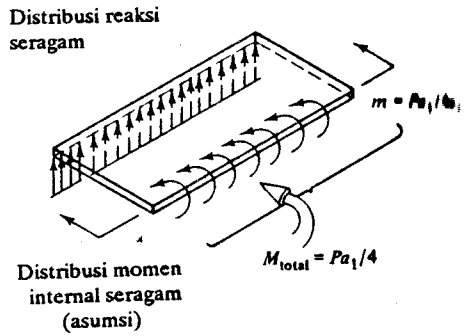
Bahwa sebagian beban yang dipikul oleh jalur-jalur balok semakin kecil untuk jalur yang terletak jauh dari posisi beban, juga akan jelas dengan meninjau bentuk



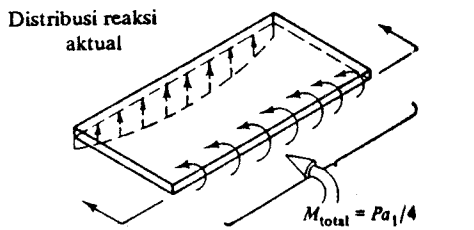
(a) Bentuk plat terdefleksi. Kelengkungan plat lebih besar di bawah beban.



(b) Dari tinjauan keseimbangan dasar jelaslah bahwa struktur harus dapat memberikan momen tahanan internal di setiap penampang untuk mengimbangi momen eksternal yang terjadi pada penampang yang sama. Apabila momen internal dianggap terdistribusi merata, maka momen rata-rata per satuan lebar plat adalah $m = Pa_1/4 : a_2$.



(c) Dengan memperhatikan bentuk defleksi plat, kita dapat mengetahui bahwa momen internal tidak mungkin terdistribusi rata, tetapi lebih besar di bagian plat yang berkelengkungan besar, dan kecil di bagian plat yang berkelengkungan kecil. Ada momen internal yang lebih besar daripada nilai rata-rata yang dihitung pada (b). Jumlah momen total per satuan lebar tetap harus sama dengan momen eksternal.



Distribusi momen internal aktual

Gambar 10-4 Struktur plat satu arah

terdefleksi struktur itu dan mengingat bahwa kelengkungan longitudinal mempunyai kecenderungan berkurang untuk bagian yang semakin ke pinggir. Dengan demikian, momen lentur internal juga akan berkurang. Gambar 10–4 secara diagramatis mengilustrasikan bagaimana momen internal dan reaksi terdistribusi pada plat. Momen pada plat biasanya dinyatakan sebagai momen per satuan panjang m (misalnya dinyatakan dalam ft–lb/ft atau kN–m/m). Reaksi yang diperlihatkan pada Gambar tersebut dinyatakan sebagai gaya per satuan panjang.

Jumlah total reaksi harus sama dengan beban total yang bekerja pada arah vertikal. Jumlah momen tahanan internal yang terdistribusi di seluruh sisi plat juga harus sama dengan momen eksternal total. Hal ini didasarkan atas tinjauan keseimbangan dasar.

Dengan menganggap bahwa plat tersebut mempunyai bentang a_1 dan lebar a_2, momen internal per satuan panjang pada plat di penampang lapangan akan sama dengan momen eksternal dibagi dengan lebar plat [$m = (Pa_1/4)\ a_2$] *apabila* kita beranggapan bahwa momen tahanan terdistribusi merata di seluruh penampang melintang. Seperti telah disebutkan, bagaimana pun, momen *tidak dapat* terdistribusi merata, tetapi bervariasi dari maksimum di tengah plat ke minimum di setiap tepinya. Sekalipun demikian, peninjauan momen rata-rata tetap masih berguna dalam mencari referensi rata-rata yang dapat dipakai untuk menunjukkan seberapa jauh momen maksimum berdeviasi. Ingat bahwa penggunaan momen rata-rata untuk maksud desain itu *tidak* konservatif.

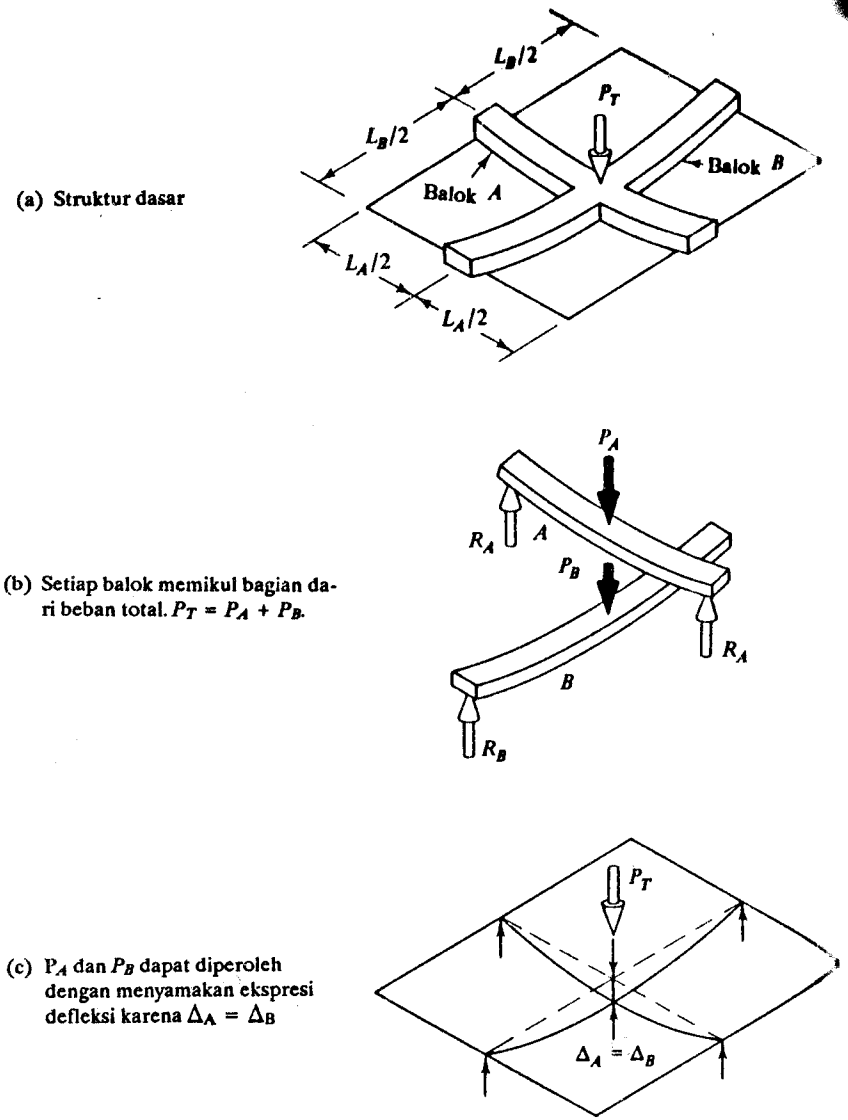
Plat tidak harus terletak di atas dua tumpuan pada kedua sisinya, tetapi dapat pula terletak pada sisi-sisi lainnya. Pada umumnya, efisiensi struktur plat dapat ditingkatkan dengan menambah banyak tumpuan tepinya. Jadi, plat bujursangkar yang terletak pada keempat tepinya secara menerus bersifat lebih kaku dibandingkan dengan yang terletak hanya pada dua tumpuan sederhana. Perilaku plat yang ditumpu menerus hampir sama dengan plat yang ditumpu sederhana, hanya saja semua aksi internal yang telah dijelaskan di atas terjadi pada kedua arah yang saling tegak lurus, bukan hanya pada satu arah. Plat demikian akan dibahas lebih lanjut pada bagian lain bab ini.

Aspek kritis pada struktur plat yang belum disebutkan di sini adalah perilakunya terhadap gaya geser. Apabila plat besar terletak pada titik tumpuan diskret (misalnya kolom), maka dapat terjadi keruntuhan pons lokal sebagai akibat dari tegangan geser yang berlebihan. Cara mencegah hal ini adalah dengan memperbesar ketebalan plat. Hal ini dapat dilakukan di seluruh permukaan atau hanya di sekitar titik tumpuan.

ANALISIS GRID DAN PLAT

10.3.1 Struktur Grid

Kunci dalam menganalisis struktur grid adalah dengan mengingat bahwa hubungan pada sistem balok menyilang, keadaan keserasian defleksi harus dapat terjadi. Perhatikan, misalnya, sistem balok menyilang sederhana yang telah dibahas pada



Gambar 10-5 Analisis sistem balok menyilang sederhana

Bab 10.3 dan diilustrasikan dalam Gambar 10–5. Dengan menganggap bahwa balok tersebut dihubungkan secara kaku, maka berarti kedua-duanya mengalami defleksi yang sama akibat beban. Dengan menyamakan kedua ekspresi defleksi masing-masing balok, kita dapat menentukan persentase relatif beban yang dipikul oleh masing-masing balok. Misalnya P_A adalah persentase dari beban total (P_T) yang dipikul oleh A dan P_B adalah yang dipikul oleh B. Dengan menyamakan kedua ekspresi defleksi untuk kedua balok tersebut agar keserasian defleksi terpenuhi, kita peroleh

$$\Delta_A = \Delta_B$$

$$\frac{P_A L_A^3}{48 E_A I_A} = \frac{P_B L_B^3}{48 E_B I_B}$$

$$\frac{P_A}{P_B} = \left(\frac{L_B}{L_A}\right)^3 \left(\frac{E_A I_A}{E_B I_B}\right)$$

Apabila kedua balok itu identik dalam segala hal kecuali panjangnya, maka ekspresi di atas menjadi:

$$\frac{P_A}{P_B} = \left(\frac{L_B}{L_A}\right)^3$$

Apabila kedua balok juga sama panjangnya, jelas bahwa $P_A = P_B = P_T/2$. Apabila $L_B = 2L_A$, maka:

$$\frac{P_A}{P_B} = \left(\frac{2L_A}{L_A}\right)^3 = 8$$

$$P_A = 8P_B$$

Jadi, balok yang lebih pendek (lebih kaku) memikul beban delapan kali lebih besar daripada balok yang panjang. Dengan mengingat bahwa $P_B = P_B = P_T$, jelas bahwa $P_A = 8P_T/9$ dan $P_B = P_T/9$. Akibat beban tersebut, momen pada balok adalah $M_A = 4P_T L_A/18$ dan $M_B = P_T L_A/18$. Jadi, momen pada balok berbentang pendek adalah empat kali lebih besar daripada momen pada balok berbentang panjang.

Analisis grid yang lebih kompleks yang mempunyai balok lebih banyak dapat dilakukan dengan cara serupa dengan yang telah diuraikan di atas. Defleksi di pertemuan balok harus memenuhi syarat keserasian. Akan tetapi, apabila di titik pertemuan syarat keserasian. Akan tetapi, apabila di titik pertemuan tersebut ada banyak balok, maka ada kesulitan analitis. Untuk grid kompleks selalu terdapat banyak persamaan yang harus diselesaikan secara simultan (biasanya dipecahkan dengan bantuan komputer). Untuk itu pembaca dianjurkan untuk mempelajari berbagai sumber lain.

Studi mengenai hasil analisis di atas menghasilkan hal yang memang sudah kita duga. Apabila elemen-elemen struktur yang bersilangan mempunyai panjang berbeda-beda, maka yang pendek (jadi yang lebih kaku) memikul beban lebih besar dibandingkan dengan yang panjang.

10.3.2 Struktur Plat

Plat di atas Kolom. Plat dapat dianalisis sebagai grid-grid menerus. Akan tetapi, kita akan mendapat manfaat lebih banyak apabila kita meninjau plat dengan memperhatikan bagaimana berbagai jenis plat memberikan momen dan gaya geser internal yang mengimbangi momen dan geser eksternal.

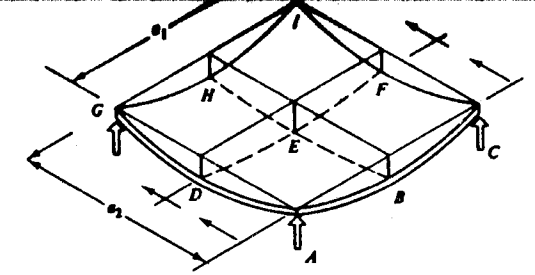
Perhatikan plat ditumpu sederhana yang terletak di atas kolom-kolom seperti terlihat pada Gambar 10–6(a). Bentuk terdefleksinya terlihat pada Gambar 10–6(b). Jelas bahwa kelengkungan plat akan lebih besar di jalur plat yang semakin dekat dengan tepi-tepi bebas plat. Hal ini menunjukkan bahwa momen internal yang timbul pada plat untuk mengimbangi momen eksternal akibat beban akan lebih besar di tepi-tepi plat dibandingkan dengan yang di tengah. Karena plat tersebut berubah bentuk dengan kelengkungan ganda akibat beban, maka jelas bahwa momen yang timbul mempunyai banyak arah, bukan hanya satu arah seperti yang biasanya terjadi pada elemen berkelengkungan tunggal (balok).

Untuk memperoleh momen internal, kita tinjau keseimbangan segmen plat. Setiap segmen plat dapat saja kita tinjau karena setiap segmen dari suatu struktur harus selalu berada dalam keseimbangan. Apabila kita ingin mencari momen sepanjang garis *D–E–F*, kita buat potongan yang melalui garis tersebut, dan kita tinjau keseimbangan segmen plat sebelah kiri atau kanan. Dalam melakukan hal ini akan lebih mudah kalau kita melihat plat dari sisi yang terlihat pada Gambar 10–6(c) di mana plat terlihat sebagai balok bertumpuan sederhana yang memikul beban terdistribusi rata per satuan panjang. Apabila lebar plat kita tulis sebagai a_1, bentang sebagai a_2, dan *beban per satuan luas* yang bekerja pada permukaan plat adalah w', maka *beban per satuan panjang* terdistribusi merata. Pada balok sederhana *analoginya* dapat ditulis sebagai $w'a_1$. Reaksi pada balok analogi tersebut pada masing-masing ujung adalah gaya-gaya reaksi pada kolom (dapat dengan mudah kita tulis $w'a_1a_2/4$). Momen lentur eksternal di tengah bentang balok sederhana seperti telah kita ketahui, adalah $wL_2/8$ di mana w adalah gaya per satuan panjang. Dalam kasus yang sedang kita bahas ini, $w'a_1$ analog dengan w dan a_2 adalah L_2. Dengan demikian, momen *toal* yang terjadi adalah $M_T = w'a_1a_2^2/8$ atau $M_T = 0{,}125\ w'a_1a_2^2$ di mana w' adalah *gaya per satuan luas.* Hasil yang sama juga akan kita peroleh apabila kita menjumlahkan momen terhadap garis *DEF,* yaitu dengan cara yang telah dibahas pada Bab 2.2.5. Apabila plat tersebut bujursangkar, maka $a_1 = a_2$ dan $M_T = 0{,}125\ w'a^3$.

Analisis yang disederhanakan seperti di atas sangat berguna karena jelas bahwa momen eksternal total di sepanjang garis *DF* sama dengan $0{,}125\ w'a^3$. Dengan demikian, plat tersebut memberikan momen tahanan internal sebesar $0{,}125\ w'a^3$. Pada balok, momen diberikan oleh satu kopel diskret yang dibentuk oleh resultan tegangan tekan dan resultan tegangan tarik yang timbul secara internal pada balok sebagai respons terhadap momen eksternal. Pada plat, momen tahanan total diberikan oleh garis menerus dari momen tahanan dengan kopel di seluruh lebar plat yang efek totalnya sama dengan momen tahanan sebesar $0{,}125\ w'a^3$. Momen diberikan ekuivalen pada balok analogi kita anggap tersebar di seluruh lebar plat.

Apabila momen tahanan total yang diberikan plat telah diketahui, maka langkah berikutnya adalah mencari distribusi momen pada penampang tersebut. *Seandainya* momen tahanan dianggap terdistribusi merata di seluruh penampang tersebut, maka *momen tahanan per satuan lebar (m)* akan sama dengan momen total dibagi dengan lebar penampang (jadi $m = 0{,}125\ w'a^3/a = 0{,}125\ w'a^2$ di mana m adalah momen internal per satuan lebar di seluruh lebar plat pada penampang yang ditinjau.

Telah disebutkan pada awal Bab 10.3.2 bahwa momen total *tidak terdistribusi*

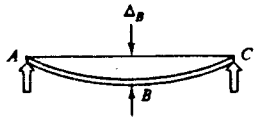


(a) Bentuk plat terdefleksi

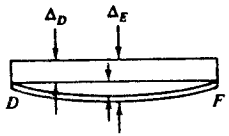
Momen internal dinyatakan dalam momen per satuan lebar plat

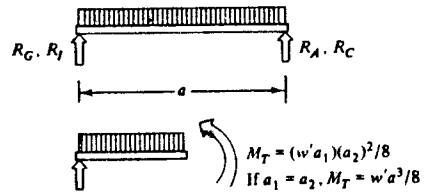
Lentur pada elemen plat di *E*

Lentur pada elemen plat di *D*

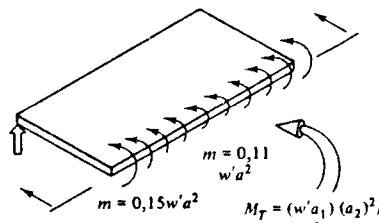


(b) Kelengkungan plat





(c) Analogi balok (sama dengan meninjau plat dari sisinya) Momen eksternal total di sepanjang garis *D-E-F* ekuivalen dengan yang ada pada balok analogi sederhana.



(d) Plat ini memberikan momen tahanan internal total yang mengimbangi momen eksternal. Momen internal ini pada dasarnya terdistribusi di sepanjang garis *D-E-F*. Momen internal maksimum terjadi apabila kelengkungan plat besar.

Variasi momen di sepanjang garis *D-E-F*

$m_{average} = 0{,}125w'a^2$

Gambar 10-6 Plat bujursangkar yang ditumpu sederhana pada empat kolom (beban terdistribusi merata W')

merata, tetapi lebih besar di tepi plat daripada di tengah. Sayangnya, distribusi eksak itu sangat rumit dan tidak termasuk di dalam lingkupan buku ini. Telah jelas bahwa nilai maksimum dan minimum tidak sama dengan nilai rata-rata $m = 0{,}125\ w'a^2$ yang disebutkan di atas. Gambar 10–6(d) memperlihatkan hasil yang diperoleh dari analisis yang lebih eksak. Momen per satuan lebar yang diperoleh dari analisis tersebut akan maksimum ditepi plat ($m = 0{,}15\ w'a^2$) dan minimum di tengah plat ($m = 0{,}11\ w'a^2$). Hasil yang sama juga akan diperoleh apabila analisisnya dibuat terhadap garis B–E–H karena struktur simetris.

Perhatikan bahwa momen maksimum pada plat terjadi di tepi bebas terhadap sumbu yang tegak lurus terhadap tepi tersebut. Momen terhadap sumbu yang sejajar dengan tepi bebas di titik yang sama adalah nol. Di titik tengah plat, momen $m = 0{,}11\ w'a^2$ terjadi untuk kedua arah tersebut.

Analisis yang dibahas di atas menunjukkan beberapa hal yang menarik. Salah satunya adalah momen maksimum terjadi bukan di titik tengah plat, di mana biasanya kita menduga lokasi tersebut dengan analogi balok, melainkan di tepi-tepi plat. Titik tengah plat, misalnya, merupakan lokasi yang baik untuk dilubangi apabila memang dibutuhkan untuk meletakkan elemen gedung lainnya.

Hal penting lain adalah bahwa plat harus memberikan momen tahanan total yang sama dengan balok analogi. Apabila plat didesain, jelas bahwa penggunaan plat tidak selalu memberikan penghematan material dibandingkan dengan balok analogi. Bagaimana pun, balok analogi pada umumnya lebih tinggi daripada plat. Keuntungan nyata dari penggunaan plat dua arah dalam hal penghematan material juga keuntungan kondisi tumpuan, tidak merupakan lingkupan buku ini.

Plat yang Ditumpu Sederhana di Tepi-tepi Menerus. Perhatikan plat yang sama yang telah dianalisis di atas, tetapi sekarang ditumpu sederhana secara menerus di semua tepinya (misalnya ditumpu oleh dinding), bukan ditumpu oleh kolom-kolom. Tentu saja bentuk terdefleksinya berbeda dengan yang ditumpu oleh kolom. Kelengkungan maksimum terjadi di titik tengah kolom, dan semakin ke tepi akan semakin kecil. Hal ini berarti pula momen internalnya lebih besar di tengah daripada di tepi.

Untuk mendapat besar momen internal itu kita gunakan metode analisis yang sama dengan sebelum ini. Akan tetapi, dalam kasus sekarang, langkah pertama (yaitu mencari reaksi plat) tidak mudah dilakukan. Dengan meninjau bagaimana plat itu berdefleksi, kita dapat melihat bahwa reaksi tidak terdistribusi secara merata, tetapi maksimum di tengah masing-masing tumpuan, dan semakin kecil pada bagian pojoknya (lihat Gambar 10–7(b)]. Ada hal yang perlu diperhatikan di sini, yaitu pojok plat cenderung terangkat ke atas apabila plat dibebani vertikal ke bawah. Apabila plat ditahan dari aksi ke atas, tentu harus ada gaya reaksi terpusat di pojok-pojok. Jumlah total reaksi ke atas tidak merata dan reaksi terpusat ke bawah di pojok-pojok harus sama dengan beban vertikal total pada plat – fakta yang jelas harus terpenuhi berdasarkan tinjauan keseimbangan. Beberapa besar kuantitatif reaksi itu tidak dibahas lebih lanjut dalam buku ini, tetapi bentuk umumnya diilustrasikan dalam Gambar 10–7(b).

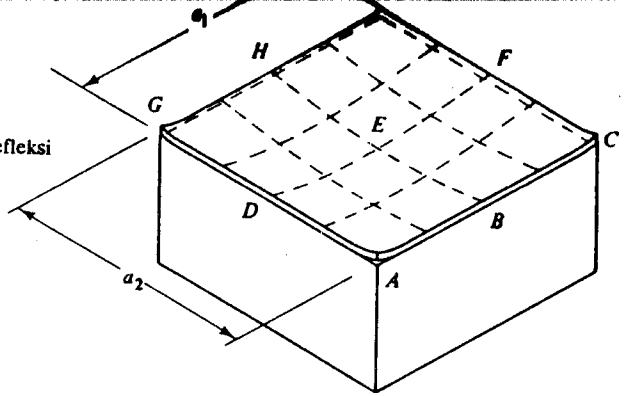
Dengan meninjau plat dengan menggunakan analogi balok, kita dapat melihat bahwa momen eksternal terbesar di sepanjang potongan lapangan (di tengah bentang) lebih kecil daripada momen pada plat yang ditumpu kolom yang telah kita analisis sebelum ini. Momen total pada plat yang terletak di atas kolom ekuivalen dengan $wL^2/8$, atau $w'a^2/8$ apabila dinyatakan dalam dimensi plat dan beban per satuan luas. Nilai ini diasosiasikan dengan reaksi terpusat di kedua ujung struktur. Dengan meninjau penurunan ekspresinya, yaitu $M_{L/2} = (wL/2)(L/2) - (wL/2)(L/4) = wL^2/8$ di mana suku pertama adalah efek reaksi ujung, jelaslah bahwa momen yang dominan adalah yang diakibatkan oleh reaksi, bukan oleh beban eksternal. Pada plat yang terletak di atas tumpuan menerus, momen yang diasosiasikan dengan reaksi harus lebih kecil daripada yang diasosiasikan dengan reaksi terpusat karean persentase reaksi yang lebih besar terdapat di bagian yang semakin dekat dengan pusat momen. Dengan demikian, momen lapangan eksternal neto juga harus berkurang karena momen dari beban tetap konstan. Momen ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan yang ada pada plat di atas empat kolom. Jadi, plat yang ditumpu menerus dapat mempunyai tinggi lebih kecil dibandingkan dengan plat yang ditumpu hanya di keempat pojoknya.

Memang, plat yang ditumpu menerus jauh lebih dikehendaki dibandingkan dengan plat yang ditumpu hanya di keempat pojoknya. Apabila tumpuan gabungan dari kedua cara tersebut digunakan, maka aksi dua arah akan semakin jelas terjadi.

Plat dengan Tumpuan Tepi Jepit Menerus. Gambar 10–8 mengilustrasikan plat yang sama dengan yang telah dianalisis di atas kecuali dalam hal sekarang tumpuan tepinya berupa jepit. Dengan tumpuan demikian, momen-momen pada plat menjadi lebih berkurang. Hal inilah yang menguntungkan dari penggunaan tumpuan jepit pada plat.

Plat di Atas Balok yang Ditumpu oleh Kolom. Gambar 10–9(a) mengilustrasikan variasi dari plat yang telah dibahas di atas, tetapi sekarang ditumpu oleh balok menerus di mana balok-balok itu ditumpu oleh kolom-kolom. Ini adalah jenis struktur yang banyak digunakan pada gedung. Dengan menganggap bahwa plat terletak secara sederhana di atas balok, kita akan mendapat kondisi yang terletak di antara situasi plat hanya di atas empat kolom dan situasi plat diatas tumpuan menerus. Apabila balok itu sangat kaku, kondisi tumpuan plat semakin mendekati situasi tumpuan tepi menerus, temasuk juga momen-momen yang terjadi pada plat. Sebaliknya, apabila balok itu sangat fleksibel, perilaku plat lebih mendekati perilaku yang ditunjukkan oleh kolom-kolom di keempat pojoknya. Pada keadaan demikian, momen plat akan lebih besar dibandingkan dengan keadaan sebelumnya. Jadi, jelas bahwa kekakuan relatif balok tepi sangat mempengaruhi besar momen yang timbul pada plat.

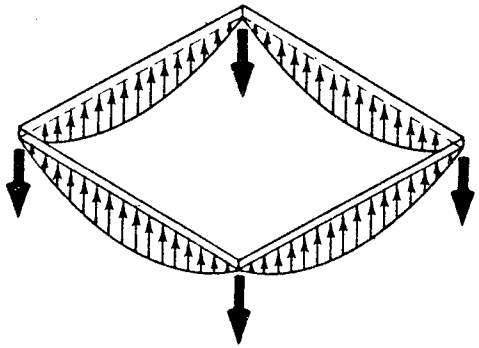
Hal menarik yang terdapat pada jenis struktur seperti ini akan jelas dengan membuat potongan transversal melalui tengah bentang. Dengan tinjauan keseimbangan, jelas bahwa struktur plat dan balok harus dapat memberikan momen tahanan internal yang benar-benar mengimbangi momen eksternal pada potongan tersebut. Kita ingat bahwa momen maksimum yang terjadi pada plat yang terletak hanya di tempat titik kolom adalah $0{,}125\ w'a^3$. Apabila balok itu sangat fleksibel



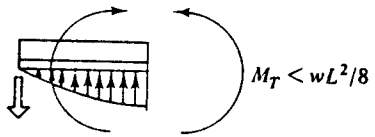
(a) Bentuk plat terdefleksi

Ujung plat cen
derung terangkat
apabila tidak dito

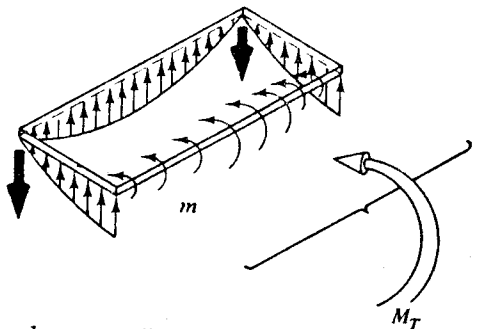
(b) Reaksi plat. Gaya ke bawah di pojok plat timbul untuk mencegah terangkatnya ujung plat.



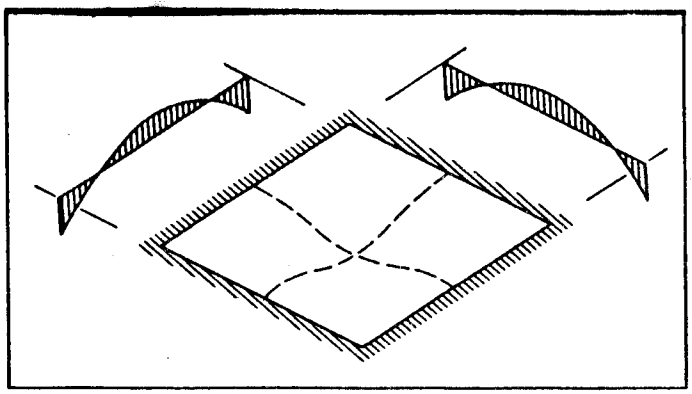
(c) Analogi balok (ekuivalen dengan meninjau plat dari sisinya). Momen eksternal yang timbul lebih kecil daripada $wL^2/8$ (momen pada balok sederhana) karena distribusi reaksi seperti tergambar ini. Momen tahanan internal total menjadi lebih kecil.



(d) Momen-momen pada plat



Gambar 10-7 Plat bujusangkar yang ditumpu secara sederhana di keempat sisinya dibebani merata, W



Gambar 10-8 Plat yang ditumpu jepit secara menerus. Kondisi tumpuan jepit menyebabkan berkurangnya momen pada plat.

($I_b \rightarrow 0$), maka jumlah momen internal yang timbul pada plat juga sama dengan 0,125 $w'a^3$. Jadi, balok yang sangat fleksibel tidak dapat memberikan tahanan momen. Sebaliknya, apabila kekakuan plat sangat kecil ($I_p \rightarrow 0$) dan tidak dapat memberikan tahanan momen, maka baloklah yang memikul seluruh momen. Jadi, setiap balok memikul momen sebesar 0,125 $w'a^3/2$. Hal yang perlu dicatat di sini adalah bahwa struktur itu harus mampu memberikan tahanan momen yang diperlukan, tetapi bagaimana distribusi momen sesungguhnya bergantung pada perilaku struktur yang dipakai. Momen memang tidak hilang, tetapi didistribusikan.

Apabila kita menggunakan balok kaku, momen pada plat akan berkurang, dan hal ini berarti plat dapat mempunyai tinggi lebih kecil. Alternatif lain, plat yang lebih kaku dapat digunakan, dan tinggi balok dapat lebih kecil (plat tersebut tentunya akan lebih tebal dibandingkan dengan pada sistem yang menggunakan balok kaku)'

Proporsi Bentang (Bay): Efek terhadap Momen. Pada pembahasan mengenai analisis grid, kita telah mengetahui bahwa bagian yang lebih kaku dari struktur grid, yaitu pada arah bentang pendek, akan menerima persentase lebih besar dari beban. Fenomena yang sama juga terjadi pada struktur planar kaku.

Perhatikan plat persegi panjang yang ditumpu menerus di keempat sisinya pada Gambar 10–10. Seperti terlihat pada kurva defleksi plat tersebut, hanya jalur plat dalam arah pendek saja yang mengalami kelengkungan besar. Jalur longitudinal hampir tidak berdeformasi, dan hanya bertranslasi ke bawah sebagai satu kesatuan. Implikasinya, hanya jalur pada arah pendek yang memberikan tahanan momen internal dan berpartisipasi dalam memikul beban. jalur pada bentang panjang hampir tidak memikul beban sama sekali.

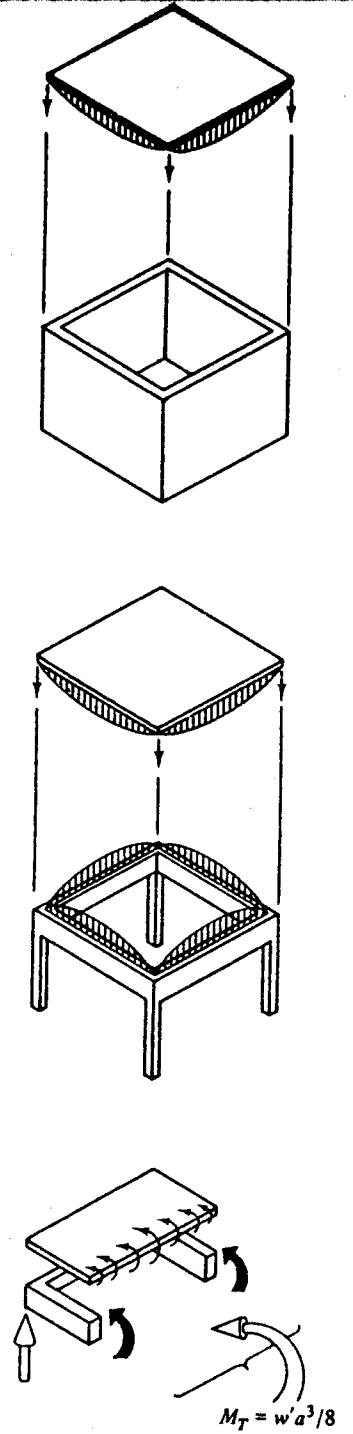
Semakin persegi panjang ukuran plat, akan semakin bersifat satu arah, bukan dua arah. Dalam keadaan demikian, plat itu seolah-olah hanya ditumpu di sepanjang tepi-tepi panjang sejajar. Sebagai akibatnya, keuntungan dari aksi dua arah tidak dapat diperoleh.

Apabila *dimensi bentang panjang/lebar* plat melebihi perbandingan sekitar 1,5, maka plat pada dasarnya sudah tidak bersifat dua arah, tetapi satu arah.

(a) Plat di atas dinding. Ini adalah kondisi tumpuan plat yang paling diinginkan.

(b) Sistem *slab* dan balok dua arah. Plat terletak di atas balok-balok. Apabila balok ini sangat kaku, maka plat akan berperilaku seolah-olah ditumpu oleh dinding. Apabila balok sangat fleksibel, maka plat berperilaku seolah-olah ditumpu oleh empat kolom di pojok-pojoknya.

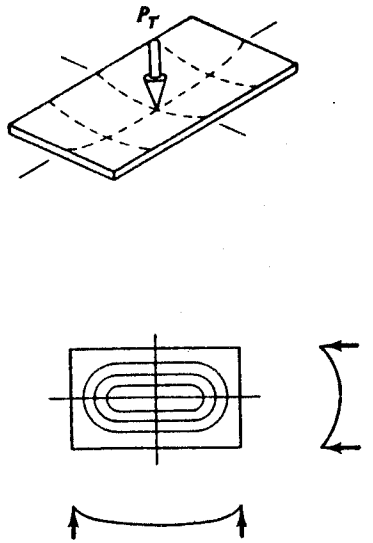
(c) Momen tahanan internal total yang diberikan oleh sistem balok dan slab harus sama dengan momen eksternal total.



Gambar 10-9 Sistem balok-dan-*slab* dua arah

(a) Kelengkungan plat akan lebih besar pada arah pendek, yang berarti bahwa momen tahanan internal pada arah ini juga besar.

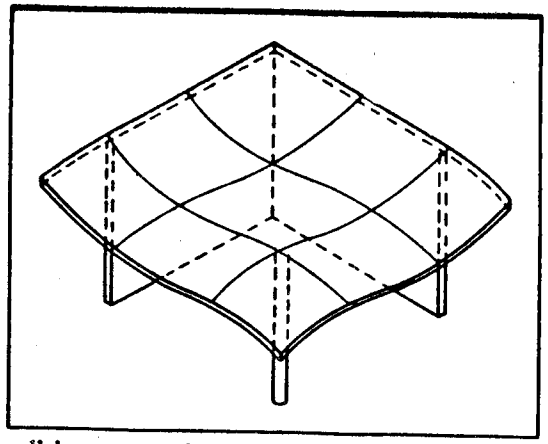
(b) Kontur defleksi. Plat ini pada da samya memikul beban pada arah bentang pendek. Jalur plat yang berbentang panjang hanya mempunyai sedikit kontribusi dalam memberikan kapasitas pikul beban plat.



Gambar 10-10 Deformasi pada plat segiempat yang ditumpu menerus di seluruh tepinya. Apabila ukuran plat semakin menjauhi bujursangkar (mendekati persegi panjang), aksi dua arah semakin berkurang. Pada keadaan tersebut, plat lebih mendekati sifat satu arah yang membentang pada arah pendek.

Jenis Plat Lainnya. Tentu saja banyak jenis plat lain yang belum kita bahas di sini. Karena pentingnya kondisi ujung, setiap jenis plat harus diperlakukan sendiri-sendiri. Pembaca dianjurkan mempelajari sumber bacaan lain mengenai plat. Solusi matematis untuk kondisi tumpuan yang rumit memang pada umumnya tidak ada. Akan tetapi, sebagaimana yang telah kita lakukan di atas, penggambaran kurva defleksi dapat membantu kita dalam mempelajari perilaku plat (lihat Gambar 10–11). Sketsa seperti ini paling sedikit dapat memberikan petunjuk lokasi momen-momen kritis negatif maupun positif sehingga dapat digunakan untuk banyak situasi (misalnya pada desain prarencana plat beton bertulang karena informasi tersebut sangat diperlukan dalam menentukan letak tulangan baja pada plat).

Perbandingan antara Plat, Grid, dan Rangka Ruang Planar. Sebagaimana telah disebutkan terdahulu, bentuk umum momen dan kelengkungan yang terjadi pada plat, grid, atau rangka ruang yang mempunyai dimensi sebanding dan memikul beban ekuivalen kurang-lebih sama. Akan tetapi, terdapat perbedaan di antara ketiga jenis struktur tersebut, terutama dalam cara memberikan momen internal. Pada struktur plat, momen internal diberikan oleh garis menerus dari kopel yang dibentuk oleh gaya tarik dan tekan di sisi atas dan bawah plat. Pada grid, kopel tahanan hanya terpusat pada balok-balok. Momen pada plat umumnya dinyatakan dalam momen per satuan panjang, sedangkan pada balok grid, momen secara kasar dapat didekati



Gambar 10-11 Kondisi tumpuan tidak biasa. Perilaku dasar plat yang mempunyai kondisi tumpuan paling sedikit dapat secara kualitatif dipelajari dengan membuat gambar dan mempelajari bentuk terdefleksi struktur tersebut (yaitu dengan memperhatikan daerah yang tertarik dan tertekan).

dengan jarak balok dikalikan dengan momen rata-rata per satuan panjang di kolom itu (semua momen plat ekuivalen pada satu daerah dianggap terpusat pada suatu balok). Perlu diperhatikan bahwa pendekatan demikian dapat memberikan hasil konservatif untuk grid *berbutir kasar* karena grid demikian dan plat sangat berbeda (khususnya dalam kontribusi kekakuan torsional dari elemen-elemen yang memikul beban). Pendekatan yang disebutkan di sini dapat menjadi konservatif apabila grid semakin berbutir halus (semakin mendekati permukaan plat kontinu). Situasi serupa juga terjadi untuk struktur rangka kecuali dalam hal kopel tahanan yang diberikan secara rangka batang, bukan secara balok.

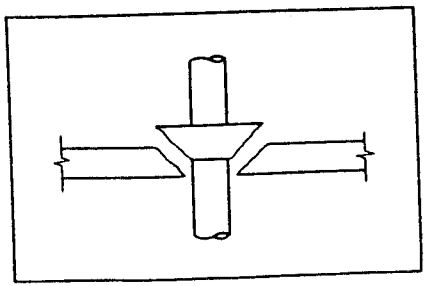
Berdasarkan uraian pada paragraf sebelum ini, distribusi momen yang telah dibahas terdahulu untuk plat dapat digunakan sebagai pendekatan untuk mempelajari perilaku grid dan rangka ruang planar.

Efek Gaya Geser. Sejauh ini pembahasan pada plat yang telah kita lakukan hanyalah mengenai perilaku lenturnya. Geser juga ada pada plat, dan kadang kala juga bersifat dominan sehingga perlu juga kita perhatikan dalam desain plat.

Gaya geser pada plat terjadi di sekitar kolom atau juga di titik-titik tumpuan diskret lainnya. Di daerah ini dapat terjadi keruntuhan pons karena besarnya tegangan geser yang terjadi. Seluruh gaya reaksi pada kolom, misalnya, harus didistribusikan dalam bentuk gaya geser ke daerah plat di sekitar pertemuan plat dan kolom.

Daerah pada plat yang menahan gaya geser eksternal dapat diperoleh dengan meninjau garis keruntuhan geser potensial. Suatu plat beton bertulang, misalnya, cenderung untuk gagal dengan cara seperti terlihat pada Gambar 10–12. Pola retak yang terjadi disebabkan oleh tarik diagonal yang diasosiasikan dengan tegangan geser yang terjadi (lihat Bab 6.4.10). Dengan demikian, daerah pada plat yang dapat

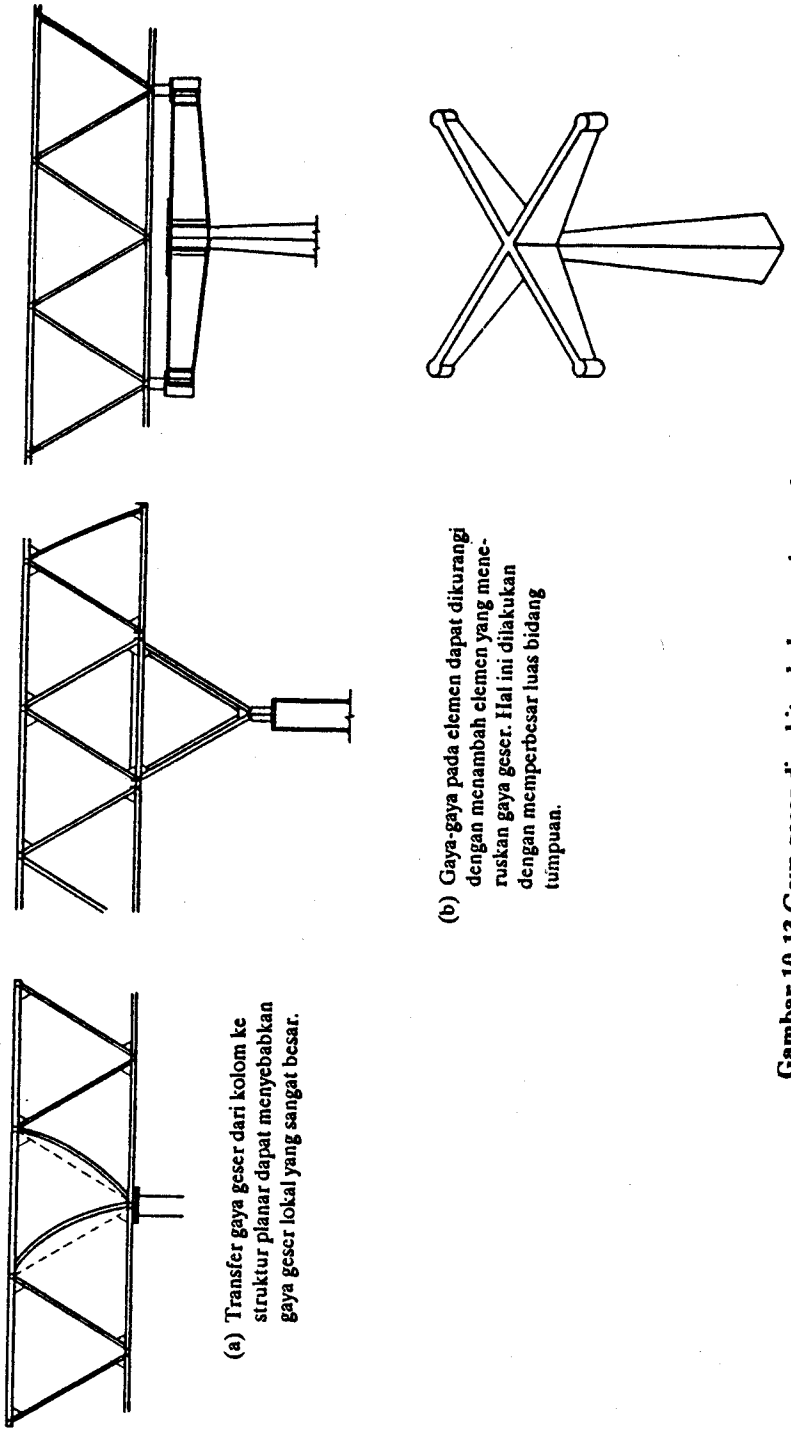
memberikan tahanan terhadap keruntuhan pons adalah permukaan retak. Permukaan itu sangat bergantung pada tebal plat dan keliling kolom. Keruntuhan pons merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan, terutama pada plat tipis, juga plat yang ditumpu di atas kolom kecil. Besar pendekatan tegangan geser pons dapat ditulis sebagai $f_v = V/A_p$ di mana A_p adalah luas plat yang mengalami geser.



Gambar 10-12 Gaya geser pada plat. Jenis keruntuhan pons dapat terjadi sebagai akibat terlalu besarnya tegangan geser. Keruntuhan seperti ini khas terjadi pada beton bertulang.

Penggunaan plat tebal dan atau kolom berukuran besar [atau kolom dengan *kepala kolom (kapital)]* dapat mengurangi tegangan geser yang terjadi pada plat. Tegangan geser bukan merupakan masalah kritis pada plat yang ditumpu menerus karena luas gesernya relatif besar.

Pada struktur planar kaku, misalnya rangka ruang, yang terdiri atas elemen struktur diskret, gaya geser di sekitar kolom dapat dikurangi dengan menggunakan elemen diagonal, dan gaya geser itu dimanifestasikan sebagai gaya-gaya tarik atau tekan yang sangat besar pada elemen diagonal (lihat Bab 4). Dengan demikian, elemen diagonal harus didesain secara khusus (lihat Gambar 10–13). Alternatif lain, kita dapat menggunakan sejumlah elemen untuk memikul gaya geser (misalnya dengan memperbesar ukuran kepala kolom).



(a) Transfer gaya geser dari kolom ke struktur planar dapat menyebabkan gaya geser lokal yang sangat besar.

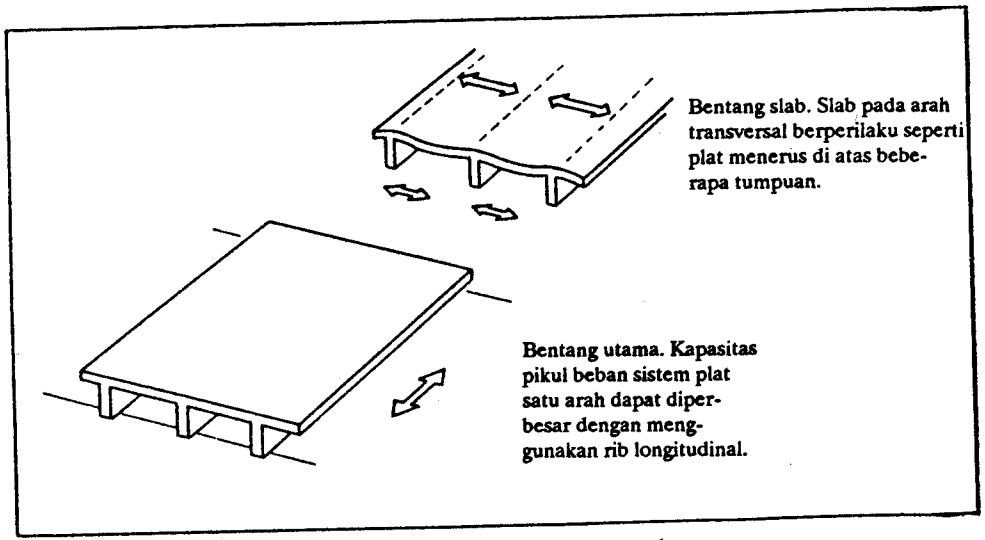
(b) Gaya-gaya pada elemen dapat dikurangi dengan menambah elemen yang meneruskan gaya geser. Hal ini dilakukan dengan memperbesar luas bidang tumpuan.

Gambar 10-13 Gaya geser di sekitar kolom pada rangka ruang

10.4.1 Sistem Satu Arah

Penentuan ukuran setiap struktur satu arah pada dasarnya merupakan proses yang diawali dengan menghitung momen dan geser yang timbul pada struktur. Kemudian ukuran elemen struktur ditentukan dengan menggunakan cara-cara yang telah disebutkan pada Bab 6 mengenai desain terhadap lentur. Telah disebutkan bahwa dalam penentuan ukuran elemen struktur perlu diketahui cara meningkatkan kapasitas pikul beban yang antara lain dapat dilakukan dengan mendistribusikan material pada penampang sedemikian rupa sehingga momen inersianya membesar (misalnya dengan membuat penampang lebih tinggi). Hal ini juga berlaku pada struktur plat.

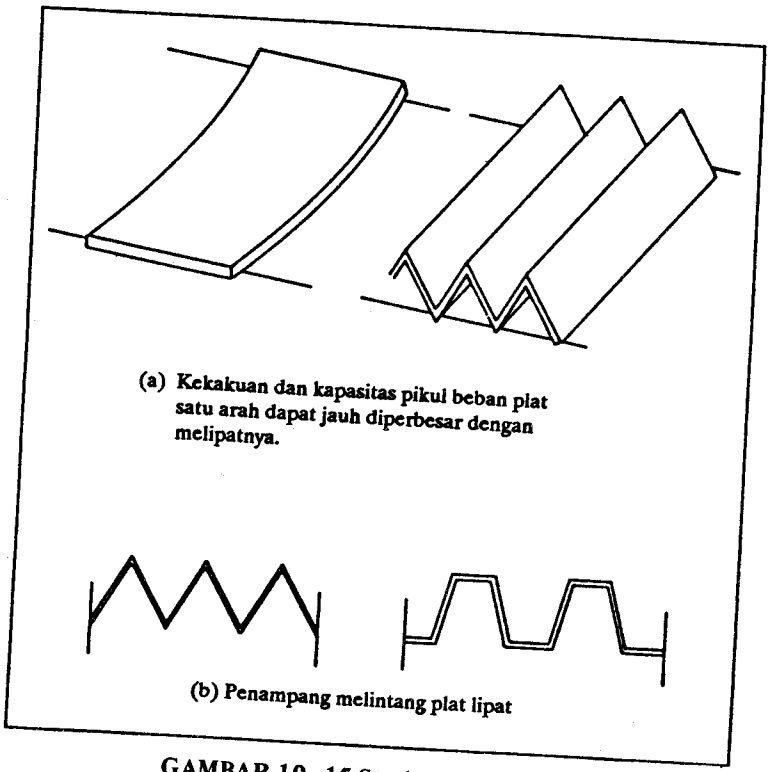
Plat Ber-rib. Plat ber-rib merupakan salah satu contoh penerapan prinsip yang disebutkan di atas (lihat Gambar 10–14). Apabila *slab* relatif lebih kaku, maka seluruh susunan akan berfungsi sebagai plat satu arah, bukan sebagai balok-balok sejajar. Akan tetapi, untuk maksud desain, biasa untuk memandang struktur itu sebagai sederetan balok T sejajar dalam arah longitudinal. *Slab* transversal dianggap sebagai plat menerus satu arah di atas balok-balok.



Gambar 10-14 Plat ber-rib satu arah

Plat Lipat. Kekakuan struktur plat satu arah dapat sangat dibesarkan dengan menghilangkan permukaan planar sama sekali, dan membuat deformasi besar pada plat sedemikian rupa sehingga tinggi struktural plat semakin besar. Dengan demikian,

plat mempunyai potongan yang unik yang terdiri atas sederetan elemen tipis yang saling dihubungkan di sepanjang tepinya (lihat Gambar 10–15). Struktur seperti ini, yang umumnya disebut *plat lipat*, sering digunakan sebagai atap, jadi umumnya dibebani terbagi rata. Karakteristik struktur plat lipat adalah masing-masing elemen plat berukuran relatif panjang. Prinsip desain yang mendasari hal ini adalah mengusahakan sedemikian rupa sehingga sebanyak mungkin material terletak jauh dari bidang tengah struktur. Elemen plat lipat seperti disebutkan di atas mereflekaikan prinsip ini, jadi mempunyai kapasitas pikul beban besar, tetapi hanya jika tekuk lateral daerah yang tertekan dapat dicegah (lihat diagram yang mengilustrasikan tekuk lateral pada Gambar 6–29). Dengan menyusun plat menjadi bentuk seperti terlihat pada Gambar 10–15, daerah tekan pada setiap plat akan selalu dapat dikekang oleh plat sebelahnya. Dengan demikian, masalah tekuk lateral dapat diatasi dan kapasitas-pikul-beban plat dapat diperoleh.

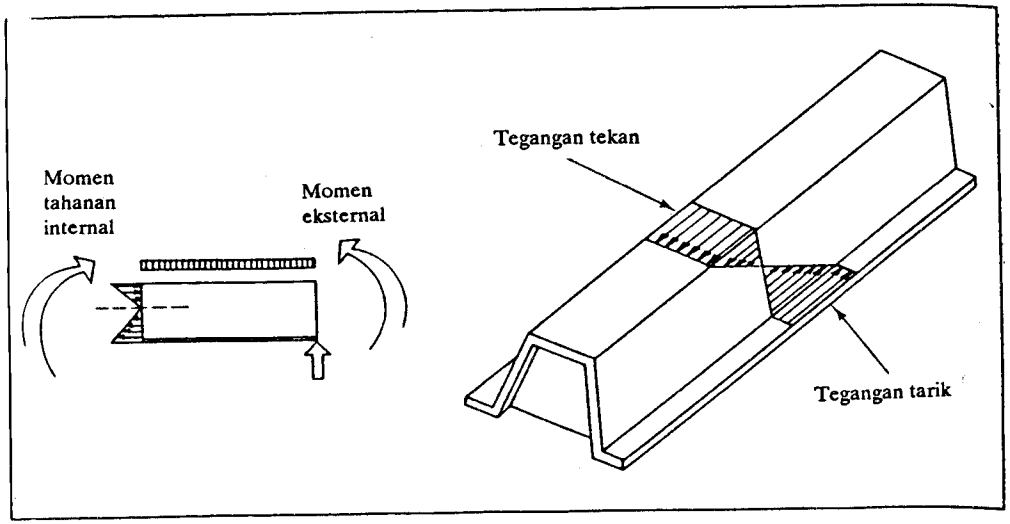


(a) Kekakuan dan kapasitas pikul beban plat satu arah dapat jauh diperbesar dengan melipatnya.

(b) Penampang melintang plat lipat

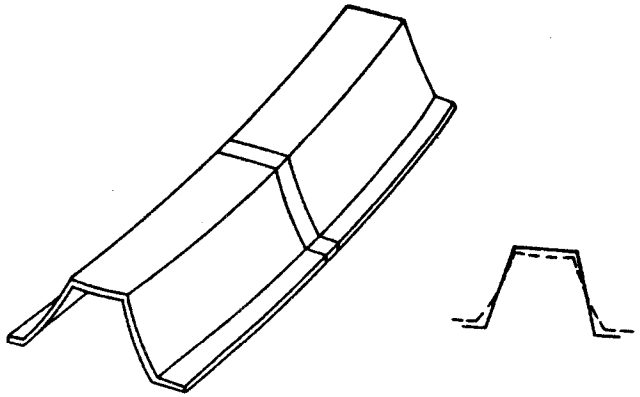
GAMBAR 10–15 Struktur plat lipat.

Bagaimana struktur plat lipat memikul beban permukaan dapat dipelajari dengan meninjau dua jenis aksi balok – yang berarah transversal dan longitudinal (Gambar 10–16 dan 10–17). Perhatikan lebih dulu aksi transversal. Sama halnya dengan plat yang saling mengekang plat lain dari kemungkinan tekuk ke luar bidang, kita juga dapat memandangnya sebagai tumpuan tepi menerus dari plat di sebelahnya. Dengan demikian, setiap plat pada susunan plat lipat dapat dipandang sebagai plat satu arah yang bentangannya adalah lebar plat tersebut. Beban permukaan disalurkan ke plat di sebelahnya dengan menggunakan *aksi balok transversal*. Apabila suatu hubungan kaku di antara elemen plat digunakan, maka jalur transversal akan berperilaku sebagai balok menerus yang ditumpu di beberapa titik (yaitu di lipatan-lipatan tersebut). Selanjutnya beban itu disalurkan dengan *aksi balok longitudinal* dari plat ke tumpuannya (reaksi jalur balok transversal mempunyai komponen pada bidang plat yang bersebelahan tepat di lipatan). Dengan demikian, untuk maksud desain prarencana, strutkur itu dapat diperlakukan sebagai balok-balok yang berpenampang unik dalam arah memanjang, dan slab satu arah dalam arah transversal.

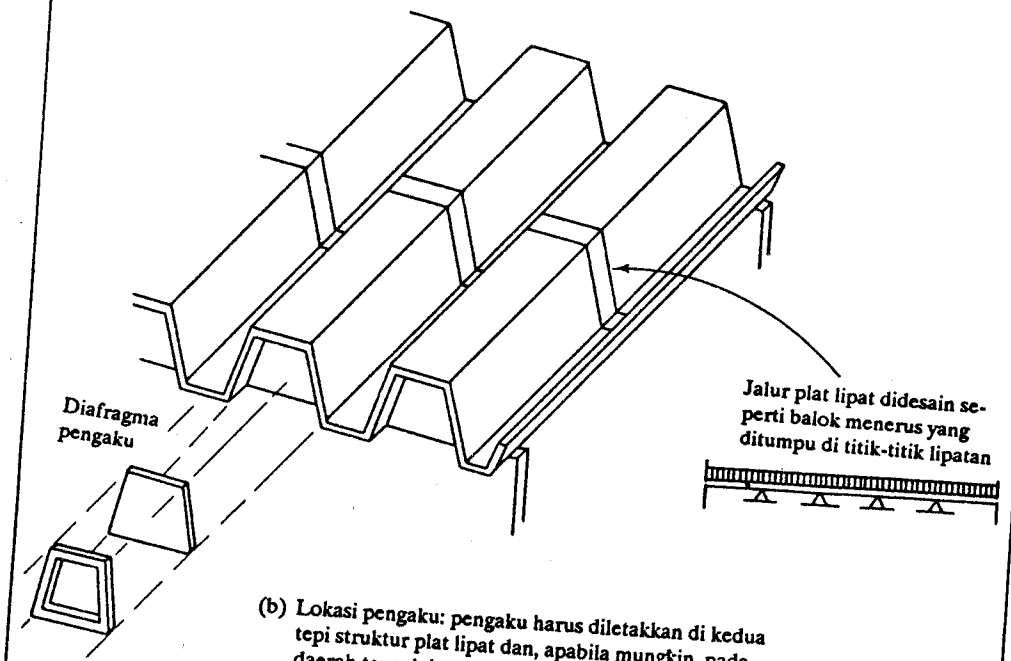


Gambar 10-16 Aksi longitudinal pada struktur plat lipat. Struktur plat lipat yang panjang dikekang oleh pengaku transversal yang pada dasarnya menyerupai balok berpenampang unik.

Sulit untuk mempertahankan sudut yang dibentuk antara plat agar tetap konstan. Deformasi berarah transversal seperti terlihat pada Gambar 10–17(a) dapat tejadi sehingga mengakibatkan berkurangnya kapasitas pikul beban struktur itu. Fenomena ini juga dapat terjadi pada ujung plat dari sederetan plat kontinu. Untuk mencegah deformasi transversal itu, kita dapat menggunakan plat-plat pengaku seperti terlihat pada Gambar 10–17(b) di ujung-ujungnya. Pengaku ini tidak hanya mencegah deformasi transversal, tetapi juga berfungsi sebagai pengekang lateral terhadap masing-masing plat. Apabila pengaku tidak digunakan, kekakuan hubungan antara plat-plat harus dijamin dapat mencegah terjadinya deformasi transversal. Dalam hal ini, momen lentur yang relatif besar akan terjadi dalam arah transversal pada hubungan, yang tentunya menyebabkan diperlukannya tebal plat lebih besar, sama halnya dengan penggunaan pengaku.

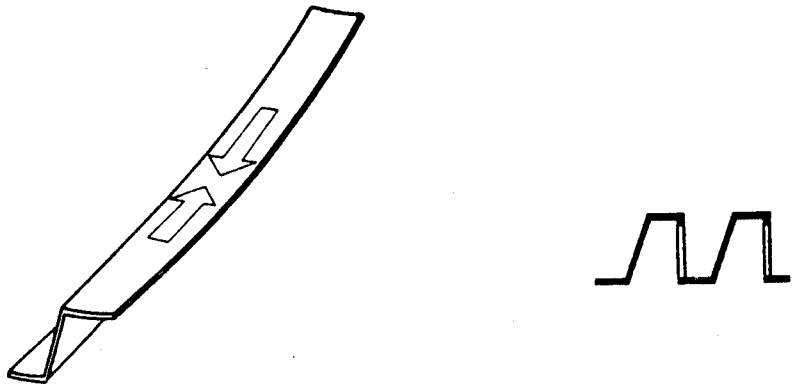


(a) Potongan melintang yang tak ditahan dari suatu plat lipat secara alami akan berdeformasi ke luar. Dengan menggunakan batang pengikat atau diafragma kaku, hal ini dapat dicegah.



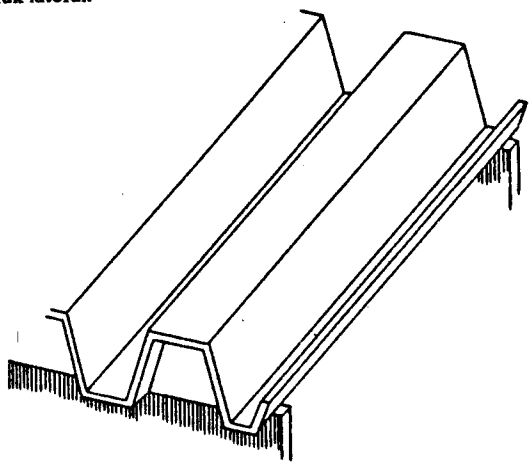
(b) Lokasi pengaku: pengaku harus diletakkan di kedua tepi struktur plat lipat dan, apabila mungkin, pada daerah tengah juga. Semakin banyak pengaku digunakan, semakin baik.

Gambar 10-17 Aksi transversal struktur plat lipat.



(a) Potongan plat di daerah tekan yang tidak dikekang secara lateral di seluruh tepinya oleh plat yang bersebelahan, dapat menyebabkan terjadinya tekuk lateral.

(b) Tepi bebas dapat dikekang dengan membelokkan tepinya dan memberi pengikat kaku untuk menghubungkan dengan plat sebelahnya.



(c) Tepi pengakhiran plat lipat biasanya pada daerah tarik. Sekalipun demikian, tepi bebas relatif bersifat fleksibel sehingga perlu diberi pengaku lokal.

Gambar 10-18 Tepi-tepi plat yang tidak ditumpu

Aksi pemikul beban yang disebutkan di atas didasarkan atas anggapan bahwa semua plat berdefleksi sama pada saat dibebani. Hal ini khususnya berlaku pada plat interior. Kita harus mengusahakan agar plat-plat itu berdefleksi sama karena, apabila tidak, dapat mempengaruhi struktur dalam arah transversal. Defleksi

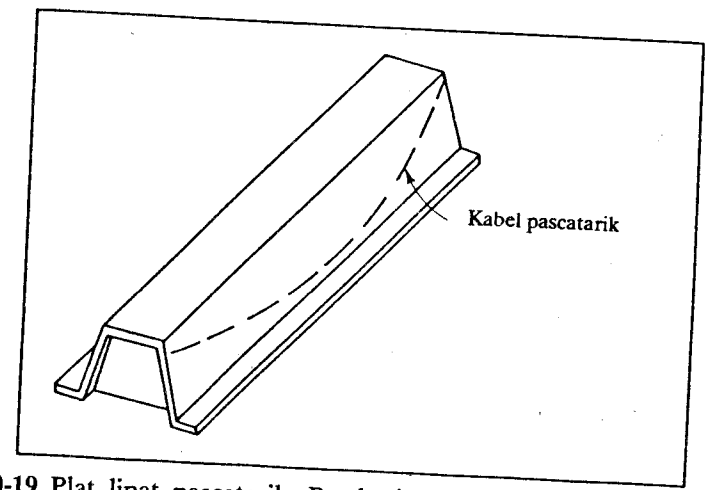
plat yang tidak sama mengakibatkan efek yang sama dengan penurunan (settlements) tumpuan pada balok menerus (lihat Bab 8.3.3) dan menyebabkan timbulnya momen lentur yang tak diinginkan pada arah transversal. Plat ujung sering berdefleksi lebih besar daripada plat interior. Jadi, plat ujung harus diperkaku (lihat Gambar 10–18) dengan menggunakan balok batas (boundary beams). Memperkaku plat yang disebut ka di atas juga berfungsi untuk menyamakan defleksi plat.

Efisiensi struktur plat lipat dapat ditingkatkan dengan meletakkan material sebanyak mungkin jauh dari sumbu netral sebagaimana pada desain balok. Dengan demikian, plat yang terlihat pada Gambar 10–16 umumnya lebih efisien daripada plat pada Gambar 10–15. Apabila material yang digunakan adalah beton bertulang, daerah datar di dasar plat dapat digunakan untuk menempatkan tulangan baja.

Kita harus berhati-hati dalam menjamin bahwa setiap plat dapat saling mengekang terhadap tekuk lateral. Konfigurasi terbuka seperti terlihat pada Gambar 10–18, dari tinjauan sebagai plat lipat tidak efisien karena plat atas mengalami tekan dan tidak dikekang dalam arah lateral di satu tepinya. Untuk mencegah tekuk lateral, kita dapat saja menggunakan pengaku lokal.

Di setiap tepi bebas plat lipat kita harus memberikan pengaku yang cukup. Pengakhiran plat di daerah tekan harus dihindari. Jadi, pengakhiran plat harus diusahakan sedemikian rupa sehingga tepi bebas adalah tepi tertarik, bukan tertekan (lihat Gambar 10–18). Pada tepi tarik sekalipun, pengaku juga harus digunakan untuk mencegah defleksi yang tak diinginkan.

Struktur plat lipat dapat dibuat dari hampir semua jenis material. Beton bertulang adalah material yang paling banyak digunakan untuk plat lipat. Dengan mengatur tulangan pada hubungan antara plat-plat yang bersebelahan, kita dapat memperoleh hubungan kaku di sepanjang tepinya. Plat lipat beton bertulang juga dapat diberi pascatarik untuk memperbesar kemampuan membentangnya (lihat Gambar 10–19)'



Gambar 10-19 Plat lipat pascatarik. Pemberian gaya pascatarik dapat secara efektif digunakan pada plat beton bertulang. Tinggi plat dapat diatur untuk mengatur pola kabel sehingga dapat memberikan aksi yang lebih efisien.

Baja juga dapat digunakan untuk plat lipat meskipun lebih jarang dibandingkan dengan beton bertulang. Hubungan kaku di antara plat yang bersebelahan dapat diperoleh dengan menggunakan las atau hubungan tertentu lainnya.

Kayu, biasanya dalam bentuk kayu lapis, juga banyak digunakan. Perlu diingat bahwa hubungan kaku di antara plat yang bersebelahan sulit diperoleh. Selain itu, untuk mencegah terjadinya deformasi lateral (splaying) pada plat, kita harus menggunakan diafragma pengaku atau mekanisme lainnya.

10.4.2 Sistem Dua Arah

Proses penentuan ukuran elemen struktur untuk memikul geser dan momen yang terjadi pada struktut dua arah sama saja dengan proses pada sembarang elemen struktur yang mengalami lentur. Akan tetapi, kita dapat melakukan langkah-langkah tertentu untuk mengurangi momen lentur yang timbul. Ada faktor-faktor kritis yang mempengaruhi desain struktur plat. Faktor-faktor tersebut akan dibahas berikut ini.

Kondisi Tumpuan. Tujuan desain utama adalah selalu meminimumkan momen lentur yang terjadi pada struktur. Cara efisien untuk melakukan hal ini pada struktur kaku planar adalah mengatur kondisi tumpuannya.

Pada umumnya, desain yang menggunakan sebanyak mungkin tumpuan menerus pada struktur planar kaku akan memberikan momen minimum pada struktur. Dengan demikian, tinggi struktur dapat berkurang. Jadi, jelas bahwa tumpuan tepi menerus lebih dikehendaki daripada tumpuan berupa kolom. Tumpuan jepit juga menghasilkan momen plat lebih kecil daripada tumpuan sederhana (lihat Gambar 10–8).

Cara yang menggunakan *overhang* seperti yang kita lakukan pada balok untuk mengurangi momen juga dapat diterapkan pada struktur planar yang mengalami letur. Pemberian kantilever pada suatu struktur dapat mengurangi momen desain maksimum yang terjadi.

Apabila sistem tumpuan dipakai secara berulang pada struktur (ada sederetan bentang kolom), maka penggunaan struktur kaku menerus dapat menghasilkan momen desain lebih kecil daripada yang diberikan oleh plat yang ditumpu sederhana hanya di titik-titik diskret. Penggunaan permukaan menerus dapat menyebabkan bagian plat pada satu bentang berperilaku menyerupai plat bertumpuan jepit (lihat Gambaar 10–20).

Proporsi Bentang: Efek terhadap Pemilihan Struktur. Seperti telah disebutkan di atas pada saat menganalisis struktur planar kaku, bila bentuk bentang semakin tidak bujursangkar (semakin berbentuk segiempat panjang), maka struktur planar akan semakin tidak bersifat dua arah dan lebih mendekati sifat satu arah, yaitu dalam arah bentang pendek. Dari tinjauan desain, konsekuensi dari fenomena ini adalah bentang harus didesain sesimetris mungkin apabila kita menghendaki aksi dua arah. Aksi dua arah akan jelas hanya apabila dimensi bentang mempunyai perbandingan antara 1 : 1 dan 1 : 1,5.

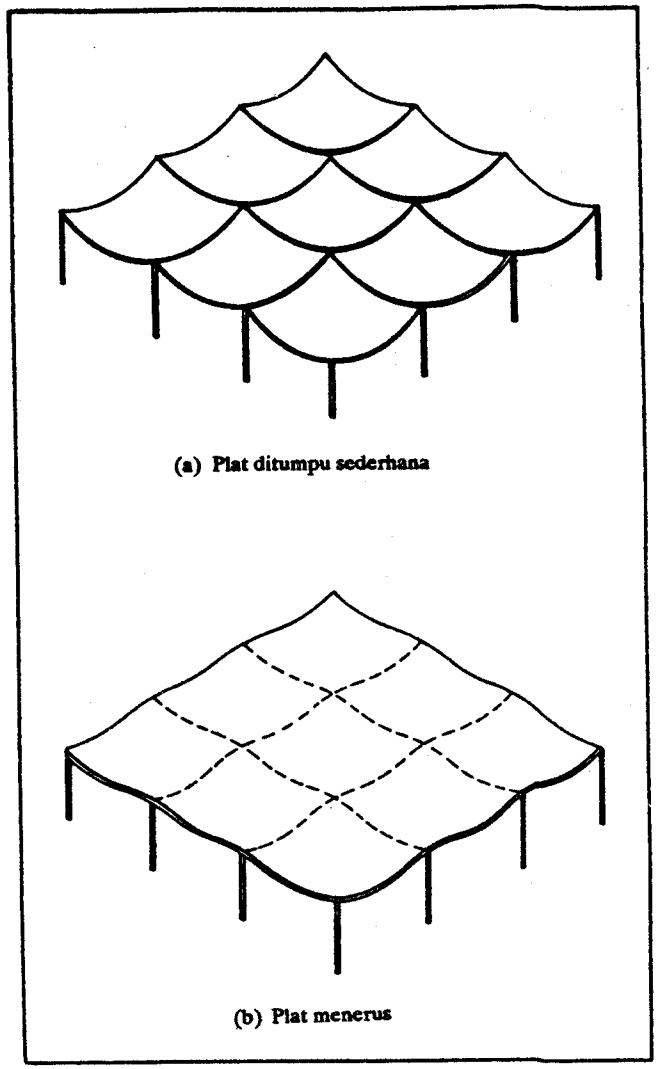
Menggunakan struktur yang kelihatannya merupakan struktur dua arah, misalnya rangka ruang, di atas bentang segiempat panjang, tidak dapat menghasilkan sifat dua arah secara jelas. Struktur itu lebih bersifat satu arah dalam arah pendek. Elemen struktur pada arah bentang pendek akan memikul beban lebih banyak. Elemen struktur longitudinal hanya memikul sedikit beban, selain memang menambah kekakuan sistem struktur. Dengan demikian, sebenarnya pada struktur demikian elemen tumpuan yang berbentang pendek dapat dihilangkan (menjadi sistem yang benar-benar satu arah, yang berarti dapat mengurangi material yang dibutuhkan). Sistem rangka batang bidang yang diletakkan pada arah bentang pendek pada Gambar 10–10 merupakan salah satu solusi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem rangka ruang yang hanya secara visual bersifat dua arah. Hal yang sama juga terjadi pada plat beton bertulang ber-rib maupun sistem grid.

Jenis-jenis Beban: Efek terhadap Pemilihan Struktur. Alasan mendasar dalam menggunakan struktur planar kaku biasanya adalah masalah fungsional. Pada struktur ini dapat digunakan plat lantai horizontal yang berguna. Beban padanya biasanya berupa beban terdistribusi merata. Apabila memang demikian, baik plat, grid dengan jaing-jaring kecil, maupun rangka ruang dapat digunakan secara lebih efisien. Untuk memikul beban terpusat besar, jenis-jenis struktur ini memang kurang efisien. Untuk memikul beban permukaan, struktur permukaan merupakan alternatif terbaik. Beban terpusat besar, bagaimana pun, dapat secara efektif dipikul oleh struktur grid berbutir halus di mana beban terpusat diusahakan bekerja tepat di pertemuan balok menyilang.

Hal lain yang juga perlu diketahui adalah adanya jenis-jenis struktur rangka ruang yang tersedia secara komersial, misalnya yan dibuat dari elemen baja ringan *cold formed*. Struktur seperti ini lebih baik digunakan untuk atap, bukan untuk lantai, karena beban atap biasanya relatif ringan. Untuk beban lantai, struktur demikian tidak cocok digunakan. Ini bukan merupakan konsekuensi dari cara struktural dasar, melainkan akibat dari sistem konstruksi yang digunakannya.

Interval Bentang. Banyak variasi bentang yang mungkin digunakan. Plat kaku yang terbuat dari beton bertulang dapat secara ekonomis mempunyai bentang dari 15 sampai sekitar 60 ft (4,5 m sampai 18 m). Rangka ruang dan grid dapat secara efisien mempunyai bentang lebih besar, bergantung pada bagaimana struktur ini dibuat. Rangka ruang yang tersedia secara komersial, misalnya, dapat dengan mudah mempunyai bentang sampai 100 ft (30 m), bergantung pada ukuran elemen struktur dan kondisi tumpuan yang digunakan. Semakin besar bentang, dibutuhkan desain yang semakin khusus.

Untuk bentang pendek yang umumnya dijumpai pada gedung [misalnya 15 sampai 30 ft (4,5 sampai 9 m)], biasanya digunakan plat beton bertulang, bukan rangka ruang atau grid, karena alasan kerumitan konstruksi. Pada Bab 14 dibahas informasi mengenai bentang secara lebih rinci.



Gambar 10-20 Plat di atas grid kolom. Permukaan plat yang menerus pada umumnya lebih disukai daripada sederetan plat ditumpu sederhana karena pada plat menerus kekakuannya lebih besar serta momen desain yang terjadi akan berkurang.

10.4.3 Desain Plat Beton Bertulang

Beton bertulang adalah material yang banyak digunakan untuk plat karena material ini dapat memberikan banyak kemungkinan dalam desain.

Beton bertulang yang dicor di tempat adalah material yang sangat berguna untuk membuat plat karena banyak alasan. Beton, misalnya, selalu dapat dibuat bersifat dua arah apabila ditulangi dengan benar. Plat beton bertulang relatif mudah dibuat. Kita juga dapat membuat hal-hal khusus dengan material beton, misalnya membuat variasi tebal plat di titik-titik kritis. Kontinuitas juga mudah diperoleh dari material ini.

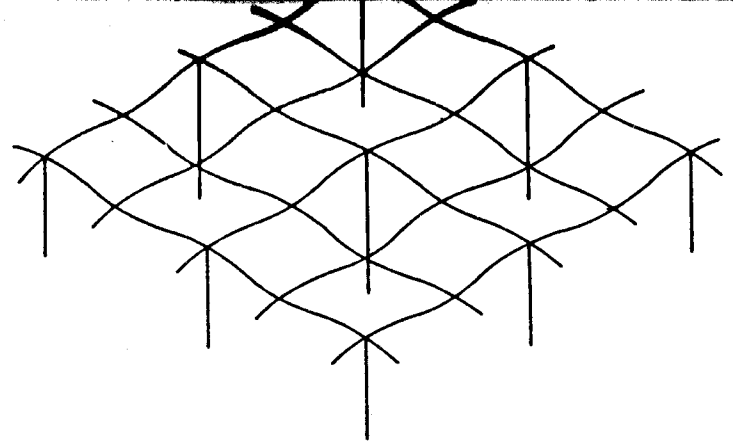
Pada Bab 10.4.3 ini kita akan membahas secara ringkas tinjauan-tinjauan desain yang penting. Pembaca dianjurkan merujuk Bab 14 dan 15 untuk mendapat informasi yang lebih rinci mengenai plat beton bertulang.

Momen Plat dan Penempatan Tulangan Baja. Tebal plat beton bertulang dan banyaknya serta lokasi tulangan baja yang digunakan pada slab atau plat bertinggi konstan, selalu bergantung pada besar dan distribusi momen pada plat itu. Gambar 10–21(a) megilustrasikan deformasi yang terjadi di daerah tarik. Tulangan baja harus diletakkan di semua daerah tarik. Berdasarkan hal ini, tulangan baja diletakkan seperti terlihat pada Gambar 10–21(b). Karena momen bersifat kontinu, maka tulangan baja harus mempunyai jarak dekat. Umumnya tulangan-tulangan dipasang sejajar. Tulangan baja dapat dibengkokkan seperti terlihat pada gambar itu sehingga tulangan terletak di daerah tarik. Alternatif lain adalah menggunakan batang-batang tulangan lurus.

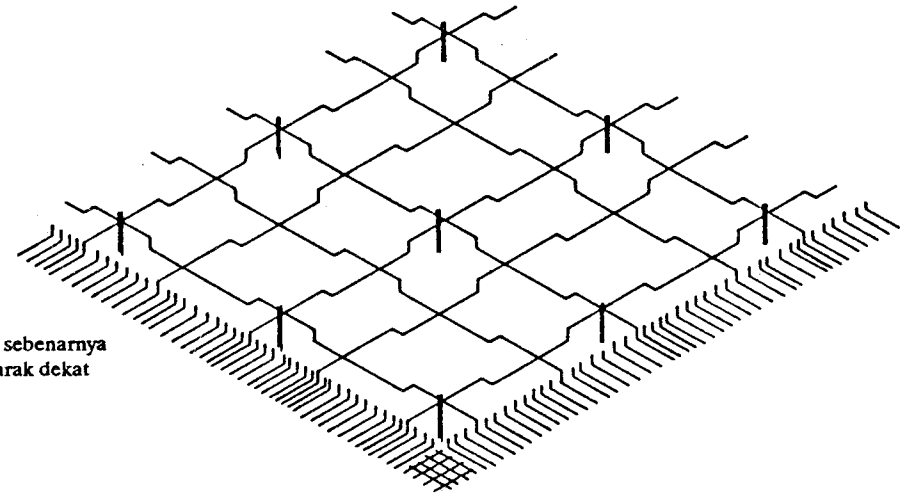
Momen desain pada plat (yang diperlukan dalam menentukan tebal plat dan ukuran tulangan) dapat dicari dengan menggunakan cara yang telah diuraikan terdahulu. Akan tetapi, untuk beton bertulang ada karakteristik khusus yang perlu diperhatikan dalam desain. Sebagaimana telah disebutkan sebelum ini, momen total (positif ditambah negatif) pada slab yang ditumpu oleh kolom adalah $M_T = w'a^3/N = 0{,}125\ w'a^3$. Dengan demikian, kita dapat mengatakan bahwa jumlah total tulangan baja ditentukan berdasarkan respons terhadap nilai momen itu. Apabila kita pelajari lebih lanjut perilaku *plastis* dari plat, akan jelas bahwa desain terhadap momen $0{,}125\ w'a^3$ ini lebih konservatif daripada yang diperlukan (lihat Bab 6.3.9 yang membahas perilaku plastis pada elemen struktur). Karena itulah kita dapat menggunakan momen desain total yang telah diperoleh secara empiris, misalnya $M = 0{,}09\ w'a^3$ yang nilainya sekitar 25% lebih kecil daripada nilai momen elastis.*

Karena menurut tinjauan konstruksi yang umumnya menghendaki tulangan baja berubah secara kontinu menurut perubahan momennya, kita dapat menggunakan cara pendekatan sederhana untuk menentukan distribusi momen plat.

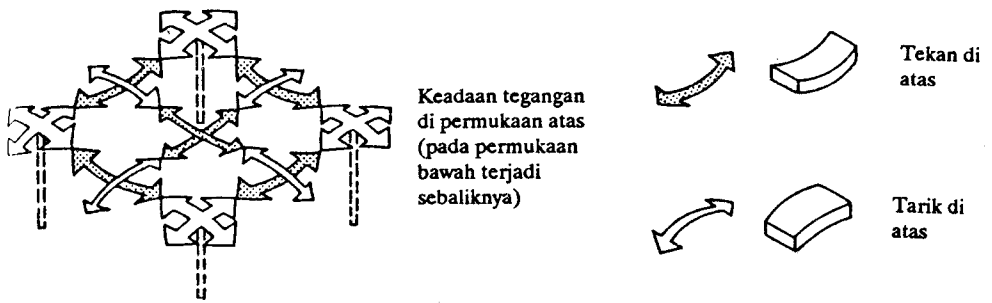
* Lihat misalnya P.M. Ferguson, *Reinforced Concrete Fundamentals*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973.



Defleksi plat



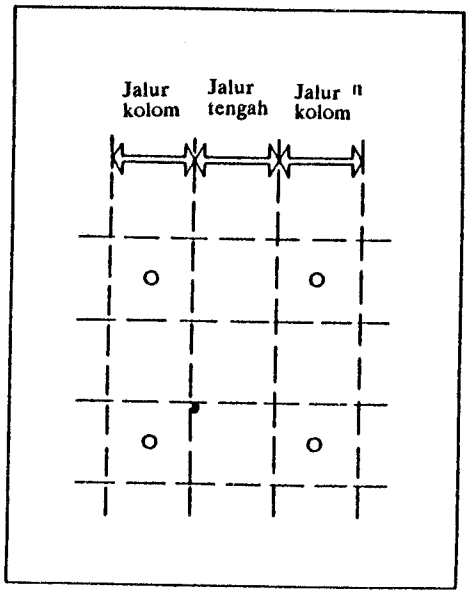
Pola tulangan baja:baja diletakkan pada daerah tarik



Gambar 10-21 Plat beton bertulang yang ditumpu oleh kolom-kolom

Plat biasanya dipandang terbagi atas *jalur kolom* dan *jalur tengah* di mana momen per satuan panjang dianggap konstan pada masing-masing jalur (lihat Gambar 10–22). Momen total $M = 0{,}09\ w'a^3$ biasanya dianggap terbagi sebagai berikut:

jalur kolom – momen positif = 22%
jalur kolom – momen negatif = 46%
jalur tengah – momen positif = 16%
jalur tengah – momen negatif = 16%

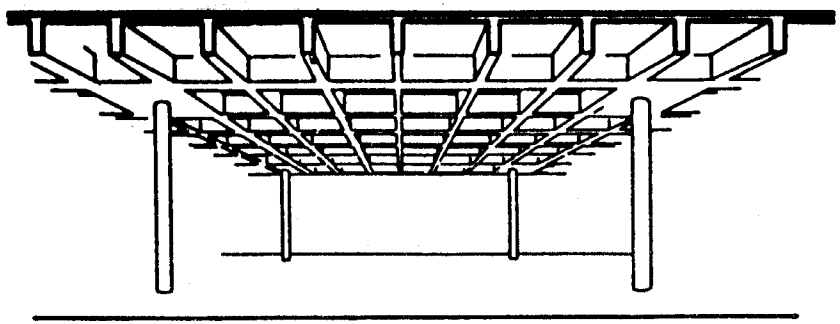


Gambar 10-22 Jalur kolom dan jalur tengah

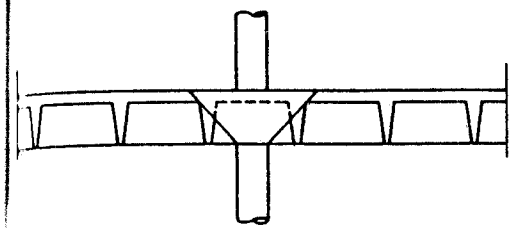
Nilai-nilai ini cukup baik untuk digunakan pada plat bujursangkar interior yang tebalnya konstan. Momen yang bekerja pada masing-masing jalur dianggap terdistribusi rata pada masing-masing jalur tersebut. Dengan demikian, momen desain dapat dinyatakan dalam momen per satuan lebar slab untuk setiap jalur.

Efek Bentang. Untuk bentang kecil [sekitar 15 sampai 22 ft (5 sampai 7 m)], beban biasa pada gedung akan menyebabkan momen yang pada umumnya dapat dipikul oleh plat tipis [sekitar 5 sampai 10 in. (13 sampai 26 cm)]. Semakin besar bentangnya, semakin besar momen yang timbul, yang artinya semakin tebal pula plat beton tersebut. Sebagai akibat penggunaan plat tebal, berat sendiri struktur juga menjadi sangat bertambah. Karena alasan itulah plat sering dilubangi untuk mengurangi berat sendirinya tanpa mengurangi tinggi strukturalnya secara berarti. Sistem demikian, yang disebut *slab wafel (waffle slab)*, diperlihatkan pada Gambar 10–23.

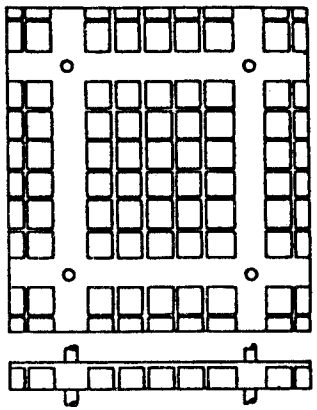
Cara lain untuk memperbesar bentang adalah menggunakan apa yang disebut *sistem balok-dan-slab dua arah* (lihat Gambar 10–24). Karena balok mempunyai kekakuan relatif besar dan berfungsi sebagai tumpuan tepi dari plat, maka momen yang timbul pada plat akan berkurang, yang berarti plat dapat dibuat tipis.



(a) Tampak. Plat yang tebalnya konstan dan dibuat berlubang-lubang dapat berkurang berat sendirinya.



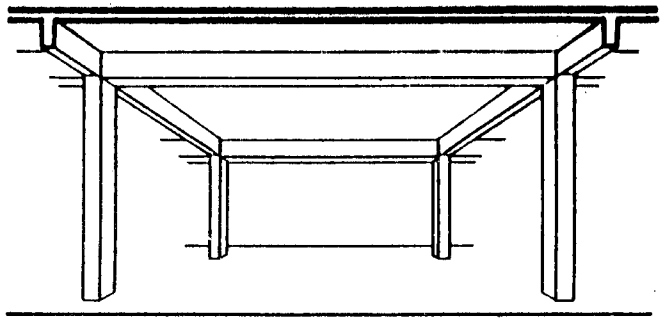
(b) Potongan. Untuk memperbesar kapasitas geser struktur, plat ini tidak dilubangi di sekitar ujung atas kolom.



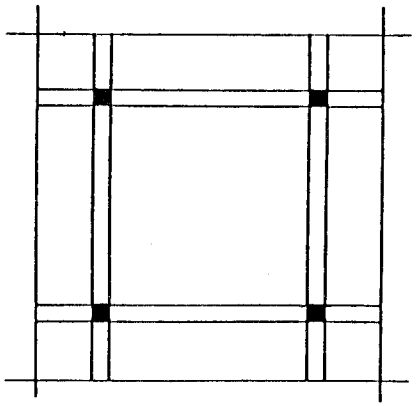
(c) Kapasitas yang membentang secara menyeluruh dari plat dapat ditingkatkan dengan tidak melubangi garis-garis antara kolom- kolom. Dengan demikian, diperoleh aksi balok-dan-slab dua arah.

Gambar 10-23 Slab wafel (waffle slab) beton bertulang

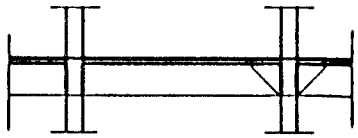
Baik sistem wafel maupun slab dua arah dapat mempunyai bentang relatif panjang. Sistem yang menggunakan hal-hal yang menguntungkan dari kedua sistem tersebut adalah yang tidak menggunakan lubang wafel di antara kolom-kolom. Dengan demikian, diperoleh sistem balok kaku. Sistem seperti ini dapat mempunyai bentang lebih besar dibandingkan dengan sistem wafel biasa. Sistem ini dapat pula diberi gaya pascatarik untuk lebih memperbesar kemampuannya. Sistem ini akan dibahas lebih lanjut pada Bab 14 dan 15.



(a) Tampak



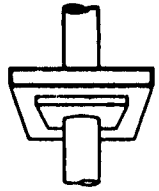
(b) Denah. Tumpuan tepi menerus berupa balok dapat memberikan pada plat tersebut kondisi tumpuan yang memperkecil momen plat.



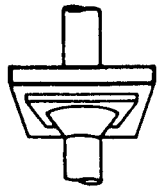
(c) Geser bukan merupakan masalah pada sistem demikian karena adanya balok dapat memberikan kapasitas geser besar.

Gambar 10-24 Slab dan balok dua arah

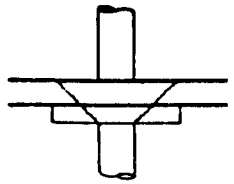
Efek Gaya Geser terhadap Desain Plat. Keruntuhan geser sebagai akibat besarnya gaya geser pada plat sering menjadi masalah yang menyulitkan dalam desain. Seperti telah disebutkan sebelum ini, besar tegangan geser yang timbul pada plat bergantung langsung pada gaya geser yang bekerja pada plat dan luas geser plat. Luas geser plat tentu saja bergantung pada tebal plat, selain juga pada panjang bidang keruntuhan yang mungkin terjadi. Panjang bidang itu bergantung pada ukuran tumpuan plat. Apabila tegangan geser terlalu besar, maka salah satu cara desain yang dapat dilakukan adalah menggunakan *drop panel* [lihat Gambar 10–25(a)]. Alternatif lain, luas geser plat diperbesar dengan memperbesar ukuran plat. Hal ini juga dapat dilakukan secara lokal dengan menggunakan kepala kolom (column capitals). Semakin besar



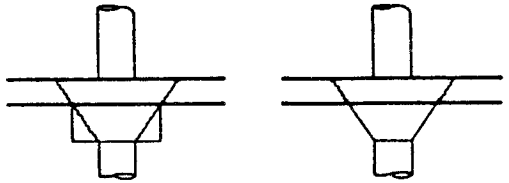
(a) Kolom dengan *drop panel*



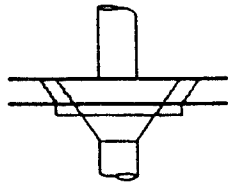
(b) Kolom dengan *drop panel* dan kepala kolom



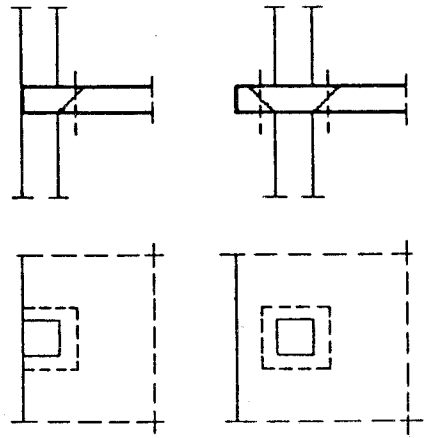
(c) Luas geser plat dapat diperbesar (jadi, tegangan gesernya mengecil) dengan menggunakan *drop panel*



(d) Kepala kolom. Penggunaan kepala kolom dapat memperbesar panjang bidang runtuh sehingga luas geser plat bertambah. Material di bawah bidang runtuh geser diagonal tidak aktif sehingga dapat dihilangkan.



(e) Drop panel dan kepala kolom. Baik *drop* panel maupun kepala kolom dapat digunakan secara simultan untuk memperbesar kapasitas geser struktur. Cara demikian digunakan apabila gaya geser yang terjadi sangat besar.



(f) Memindahkan lokasi kolom ke dalam. Pada tepi bebas dari plat, kapasitas pikul geser berkurang karena berkurangnya panjang bidang kritis geser plat. Dengan memindahkan lokasi kolom ke dalam, kapasitas geser sistem tersebut dapat diperbesar. Jenis kondisi tepi seperti ini umum digunakan pada struktur plat.

Gambar 10-25 Desain terhadap geser pada plat beton bertulang

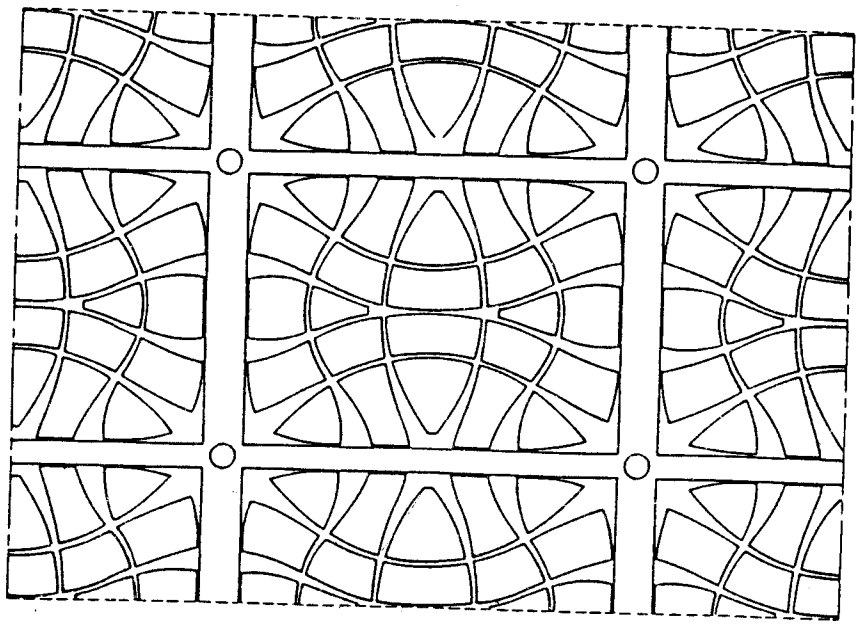
kepala kolom, akan semakin besar pula luas geser plat. Kepala kolom dapat mempunyai berbagai bentuk. Akan tetapi, karena keruntuhan geser diagonal menyebabkan material di bawah garis 45° tidak aktif, maka kepala kolom sering kali dibuat berbentuk miring.

Baik *drop panels* maupun kepala kolom dapat secara simultan digunakan. Tentu saja kapasitas pikul geser sistem demikian akan sangat besar. Sistem ini lazim digunakan untuk memikul beban yang sangat besar (misalnya gudang).

Slab beton bertulang yang tidak menggunakan kepala kolom biasanya disebut plat saja, sedangkan slab yang menggunakan kepala kolom dan atau *drop panel* biasanya disebut slab datar *(flat slabs)*.

Geser juga dapat merupakan masalah pada slab wafel, tetapi hal ini relatif mudah ditanggulangi. Daerah di sekitar kolom biasanya tidak berlubang. Jadi, pada sistem ini sebenarnya digunakan kepala kolom (lihat Gambar 10–23). Pada sistem balok dan slab, adanya balok yang menyatu dengan kolom memperkecil gaya geser yang harus dipikul oleh plat. Dengan demikian, pada sistem balok-dan-slab, gaya geser biasanya tidak merupakan masalah (lihat Gambar 10–24).

Efek Beban Lateral. Plat atau slab yang dicor secara monolit dengan kolom biasanya cenderung membentuk struktur rangka yang mampu memikul beban lateral. Kapasitas pikul beban lateral pada struktur ini bergantung antara lain pada tebal elemen struktur horizontal pada pertemuan dengan kolom (semakin tinggi, akan semakin besar pula lengan momen, yang berarti semakin besar tahanannya). Sistim kolom dan plat tipis dapat memikul beban lateral, tetapi kapasitasnya relatif kecil. Sistim slab



Gambar 10-26 Struktur plat ber-rib yang merefleksikan garis-garis isostatis

dan balok dua arah dapat memikul beban lateral yang relatif besar. Sistim slab dan-balok dua arah secara alami membentuk sistem rangka dan digunakan apabila kapasitas pikul beban lateral merupakan hal yang sangat penting. Pembaca dapat membaca Bab 14 dan 15 untuk mempelajari hal ini secara lebih rinci.

Plat-plat Khusus. Analisis lebih rinci mengenai distribusi tegangan elastis pada plat mempunyai kaitan erat dengan apa yang disebut garis-garis *tegangan utama*. Garis-garis ini, sering juga disebut *isostatis*, adalah arah di mana tegangan geser torsional nol. Banyak perencana yang membuat plat ber-rib yang polanya mengikuti garis isostatis ini (lihat Gambar 10–26). Struktur demikian, tentu saja, mahal untuk dilaksanakan, tetapi hal ini diimbangi dengan efisiennya material yang digunakan. Jenis struktur ini memang menarik, tetapi aneh menurut tinjauan teori klasik dalam hal struktur ini merepresentasikan manifestasi fisis dari model distribusi tegangan pada material elastis. Tentu hal ini bertentangan dengan keadaan aktual karena, seperti telah kita ketahui, material beton bersifat inelastis.

SOAL

10–1. Untuk sistem balok menyilang pada Gambar 10–5, buatlah gambar yang menunjukkan persentase relatif dari beban yang dipikul oleh masing-masing balok untuk tinggi balok yang berubah-ubah. Ulangi hal serupa untuk menggambarkan momen lentur yang ada.

10–2. Berapakah momen maksimum yang terjadi pada plat bujursangkar yang ditumpu sederhana di pojok-pojoknya oleh empat kolom, dan memikul beban terbagi rata sebesar 80 lb/ft^2? Anggaplah plat tersebut mempunyai tebal 6 in. dan berukuran 15 ft x 15 ft. Anggap bahwa berat satuan beton bertulang adalah 150 lb/ft^3.
Jawaban: 5231 ft–lb/ft.

10–3. Buatlah dari karton yang memodelkan plat lipat pada Gambar 10–1a. Jangan menggunakan pengaku transversal. Berilah pada model tersebut beban besar di tengah bentangan. Perhatikan perilakunya, dan catatlah beban yang dapat mengakibatkan keruntuhan. Selanjutnya, berilah pada model tersebut pengaku ujung yang direkat dengan lem. Lakukan pula pembebanan hingga runtuh, dan catatlah beban yang menyebabkan keruntuhan itu. Lanjutkan dengan menambah pengaku pada interior struktur (misalnya di titik ketiga), dan ulangi pembebanan seperti sebelumnya. Diskusikanlah hasilnya.

Bab 11

STRUKTUR MEMBRAN

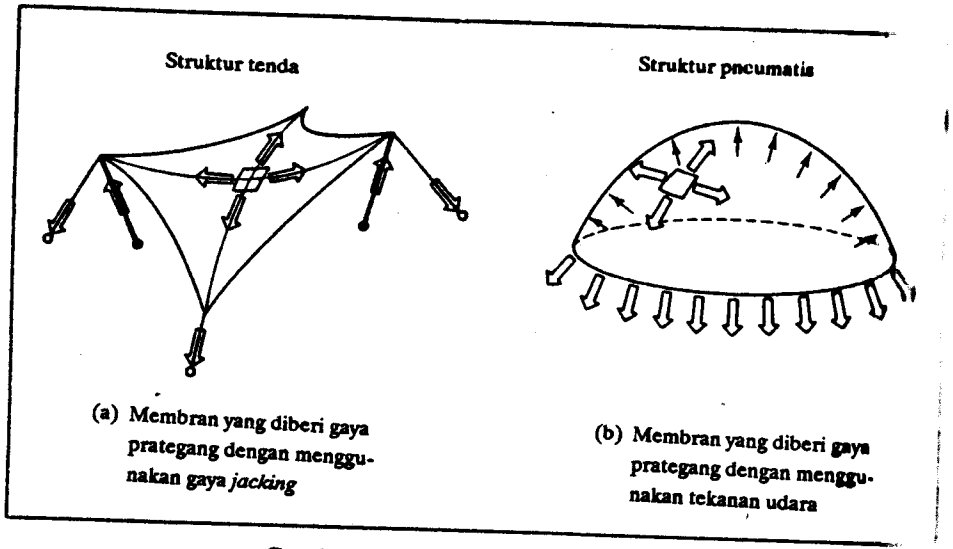
11.1 PENDAHULUAN

Membran adalah struktur permukaan fleksibel tipis yang memikul beban dengan mengalami terutama tegangan tarik. Gelembung sabun adalah contoh klasik yang dapat dipakai untuk mengilustrasikan apakah struktur membran itu dan bagaimanakah perilakunya. Struktur membran cenderung dapat menyesuaikan diri dengan cara struktur tersebut dibebani. Selain itu, struktur ini sangat peka terhadap efek aerodinamika dari angin. Efek ini dapat menyebabkan terjadinya *fluttering* (getaran). Fenomena ini telah kita bahas pada Bab 5. Dengan demikian, membran yang digunakan pada gedung harus distabilkan dengan cara tertentu hingga bentuknya dapat tetap dipertahankan pada saat memikul berbagai kondisi pembebanan.

Ada beberapa cara dasar untuk menstabilkan membran. Rangka penumpu dalam yang kaku, misalnya, dapat digunakan. Pada bab ini kita akan membahas secara khusus penstabilan dengan menggunakan prategang pada permukaan membran. Hal ini dapat dilakukan baik dengan memberikan gaya eksternal yang menarik membran maupun dengan menggunakan tekanan internal apabila membrannya berbentuk volume tertutup.

Contoh pemberian prategang yang menggunakan gaya eksternal adalah struktur tenda. Akan tetapi, ada pula tenda yang tidak mempunyai permukaan yang benar-benar ditarik oleh kabel sehingga dapat bergerak apabila dibebani. Sekalipun dapat memikul beban angin normal, misalnya, banyak permukaan tenda yang dapat bergetar sebagai akibat dari efek aerodinamika dari angin kencang. Karena itulah tenda lebih banyak digunakan sebagai struktur sementara, bukan sebagai struktur permanen. Sekalipun demikian, kita dapat memberi prategang pada membran dengan memberikan gaya *jacking* yang cukup untuk tetap menegangkan membran pada

berbagai kondisi pembebanan yang mungkin terjadi (lihat Gambar 11–1). Bia
membran itu diberi tegangan dalam arah tegak lurus di seluruh permukaannya
Banyak atap yang menggunakan struktur seperti ini.



(a) Membran yang diberi gaya prategang dengan menggunakan gaya *jacking*

(b) Membran yang diberi gaya prategang dengan menggunakan tekanan udara

Gambar 11-1 Struktur membran

Menstabilkan membran dengan menggunakan tekanan internal dapat dilakukan apabila membran mempunyai volume tertutup. Kelompok membran demikian biasa disebut *struktur pneumatis*, sebutan yang yang sesuai dengan cara struktur itu mendapat kestabilan. Meskipun struktur pneumatis seperti ini masih terbilang baru digunakan, teknologi mengenai pneumatis telah lama diketahui. Kulit air, misalnya adalah jenis struktur pneumatis yang telah lama dikenal oleh manusia.

Penggunaan struktur pneumatis pada gedung masih relatif baru. Seorang ahli dari Inggris yang bernama William Lanchester pernah mengajukan patennya dalam menerapkan prinsip balon ke dalam bangunan rumah sakit pada tahun 1917. Pada tahun 1922 dibangun pula Oasis Theater di Paris yang menggunakan struktur atap berlubang pneumatis. Banyak penelitian mengenai pneumatika yang dilakukan pada masa Perang Dunia II karena adanya nilai militer pada struktur pneumatis. Penggunaan struktur yang ditumpu udara (air supported structures) dimulai pada tahun 1946, yaitu pada bangunan *radomes* yang di dalamnya terdapat antena radar yang sangat besar. Pada dewasa ini pneumatika telah menjadi sebutan yang umum pada konteks gedung.

11.2.1 Aksi Dasar

Dasar mekanisme pikul beban pada struktur membran adalah tarik. Membran yang memikul beban tegak lurus terhadap permukaannya dapat mengalami deformasi secara tiga dimensi (bergantung pada kondisi tumpuan dan pembebanannya) dan memikul beban secara tarik [gaya tarik pada–bidang (in-plane) terjadi pada permukaan membran]. Aksi pikul beban ini serupa dengan yang terjadi pada sistem kebel menyilang. Selain tegangan tarik, terjadi juga tegangan geser tangensial pada struktur membran, yang diasosiasikan dengan torsi yang secara normal terjadi pada permukaan lengkung. Kedua jenis tegangan ini bekerja sama dalam memikul beban. Jadi, pada membran terjadi aksi tarik dua arah dan aksi geser tangensial apabila membran distabilkan dan dibebani secara *funicular* serta beban itu tidak menyebabkan terjadinya tegangan tekan.

Berikut ini kita akan membahas prinsip-prinsip dasar mengenai desain struktur membran yang selalu mengalami tarik pada berbagai kondisi pembebanan.

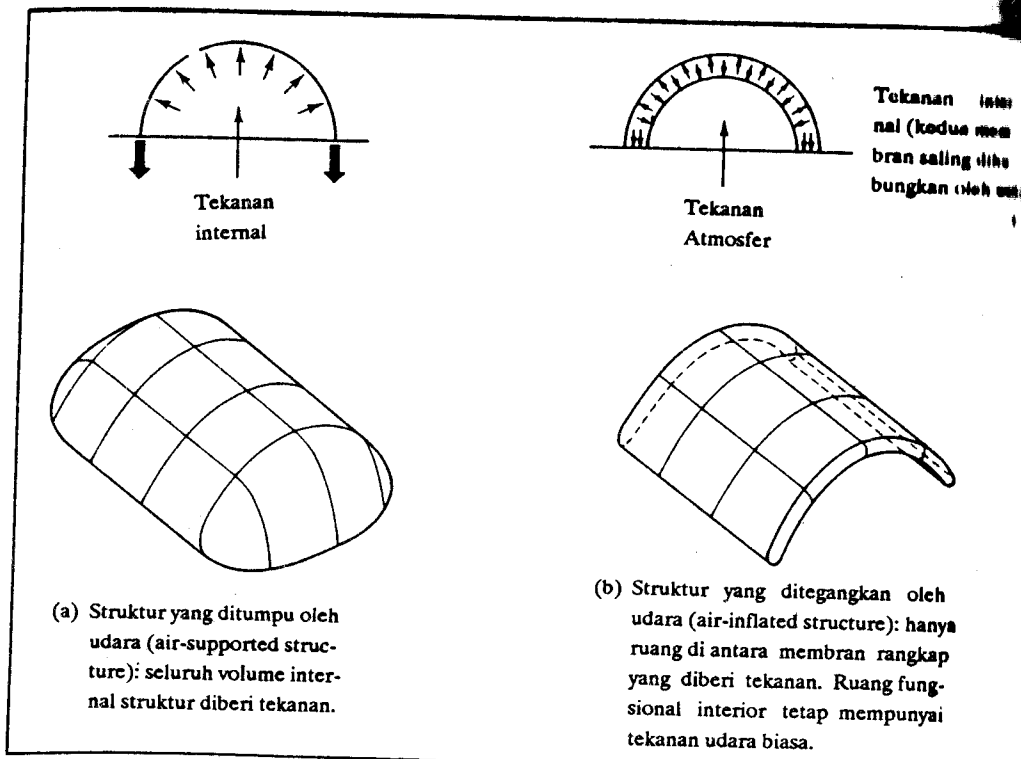
11.2.2 Struktur Pneumatis

Ada beberapa jenis struktur membran yang mendapat kestabilannya dari tekanan internal. Sebutan *struktur pneumatis* biasanya digunakan untuk konstruksi pneumatis khusus yang digunakan pada gedung. Banyak di antara struktur ini yang menggunakan udara sebagai medium tekanan. Gas lainnya (atau bahkan cairan), bagaimana pun, dapat pula digunakan.

Ada dua kelompok utama pada struktur pneumatis: struktur yang ditumpu udara (air–supported structure) dan struktur yang digelembungkan udara (air–inflated structure). Struktur yang ditumpu udara terdiri atas satu membran (menutup ruang yang berguna secara fungsional) yang ditumpu oleh perbedaan tekanan internal kecil. Dengan demikian, volume internal udara dalam gedung ini mempunyai tekanan lebih besar daripada tekanan udara biasa. Struktur yang digelembungkan udara ditumpu oleh kandungan udara bertekanan yang menggelembungkan elemen-elemen gedung. Volume internal udara gedung tetap sebesar tekanan udara. Penggabungan antara kedua struktur tersebut dapat saja dilakukan.

Pada kedua jenis struktur, tekanan udara mempengaruhi tegangan tarik pada membran. Gaya eksternal yang bekerja pada membran menyebabkan berkurangnya tegangan tarik. Tekanan internal harus sedemikian besarnya hingga untuk berbagai kondisi pembebanan tidak akan terjadi tegangan tekan. Kestabilan menyeluruh hanya dapat diperoleh apabila seluruh membran tetap berada dalam keadaan tarik. Bagaimana pun, tegangan tarik awal yang ditimbulkan dari pemberian tekanan tidak boleh melebihi tegangan izin material.

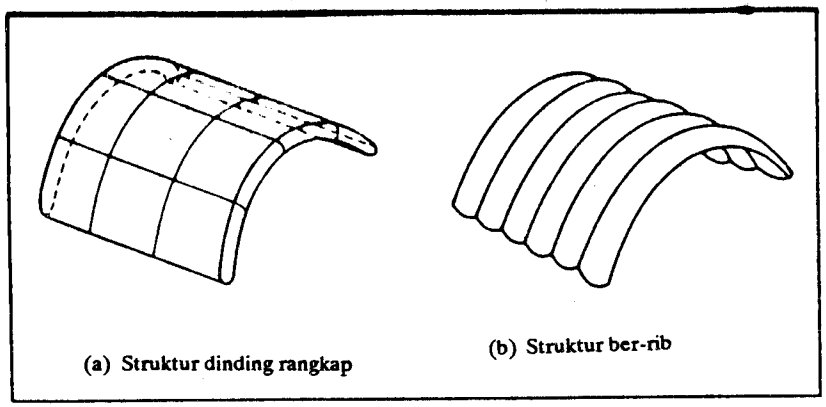
Struktur yang ditumpu udara harus selalu mempunyai tekanan udara internal sedikit lebih besar daripada tekanan udara, untuk menjamin membran tersebut berada dalam keadaan tarik [Gambar 11–2(a)]. Tekanan internal aktual tidak boleh terlalu besar agar tetap dapat memberikan rasa nyaman pada pengguna gedung.



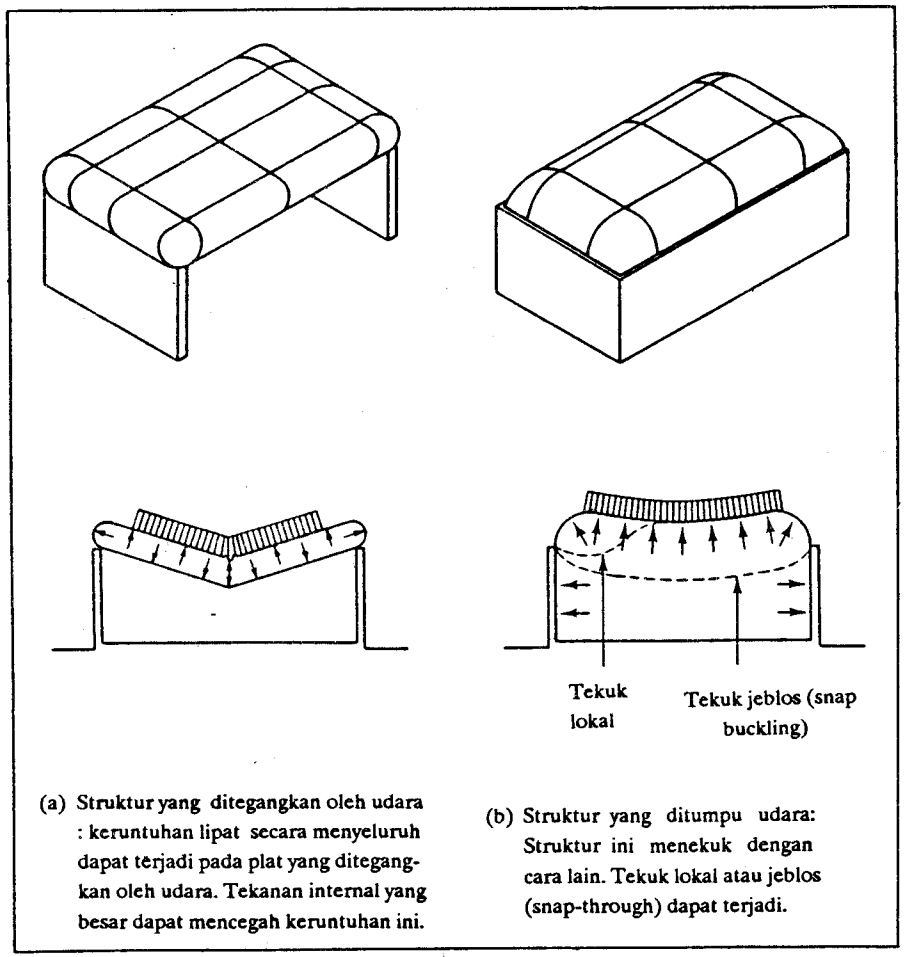
Gambar 11-2 Struktur pneumatis :bentuk yang ditumpu udara (air-supported) dan yang digelembungkan udara (air-inflated)

Apabila beban eksternal merata, misalnya, tekanan internal yang sama akan langsung memikul beban. Dengan demikian, membran hanya berfungsi sebagai pemikul. Karena beban eksternal biasanya relatif kecil, maka tekanan internal yang diperlukan juga dapat relatif kecil. Bayangan yang tepat untuk menggambarkan besarnya tekanan pada struktur yang ditumpu udara adalah tas udara bertekanan rendah, bukan ban mobil yang bertekanan tinggi.

Struktur yang digelembungkan udara mempunyai mekanisme pikul beban yang lain seperti terlihat pada Gambar 11–2(b). Udara yang ditekan digunakan untuk menggelembungkan bentuk-bentuk (misalnya pelengkung, dinding, atau kolom) yang digunakan untuk membentuk penutup gedung. Ada dua jenis utama dari struktur yang digelembungkan udara yang banyak digunakan, yaitu struktur rib tergelembung dan struktur dinding rangkap (Gambar 11–3). Struktur ber-rib terdiri atas sederetan tabung yang digelembungkan, biasanya berbentuk lengkung, dan membentuk penutup ruang. Struktur dinding rangkap terdiri atas sistem membran sejajar. Ruang di antara membran ini diberi tekanan. Membran-membran ini digabung dengan menggunakan diafragma. Untuk mendapat kestabilan, struktur yang digelembungkan udara biasanya memerlukan tekanan lebih besar daripada yang



Gambar 11-3 Struktur yang digelembungkan dengan udara *(air- inflated structures* dinding rangkap dan ber-rib.



Gambar 11-4 *Plate-forms*: Struktur yang digelembungkan udara (air-inflated structures) dan struktur yang ditumpu-udara (air- supported strucures)

dibutuhkan oleh struktur yang ditumpu udara. Hal ini adalah karena tekanan internal tidak dapat langsung digunakan untuk mengimbangi beban eksternal- tetapi harus digunakan untuk memberi bentuk pada struktur. Jadi, jelas bahwa contoh struktur plat yang digelembungkan udara pada Gambar 11–4 jauh lebih mudah runtuh karena tekuk atau karena lipat pada permukaan atas apabila tekanannya kecil dibandingkan dengan struktur yang ditumpu udara. Kedua sistem tersebut akan mempunyai kapasitas pikul beban sama apabila plat yang digelembungkan diberi tekanan yang cukup besar.

Sekalipun demikian, struktur yang ditumpu udara memang tidak selalu menguntungkan dibandingkan dengan struktur yang digelembungkan udara. Plat yang digelembungkan udara dapat memberikan kebebasan relatif banyak dalam desain ruang fungsional. Selain itu, struktur ini hanya membutuhkan tumpuan yang lebih sederhana daripada struktur yang ditumpu udara. Struktur yang disebut terakhir ini membutuhkan sistem penjangkaran tepi yang harus dapat mengikat membran secara teguh dengan tanah.

Pada umumnya, sistem yang ditumpu udara dapat mempunyai bentang lebih besar daripada struktur yang digelembungkan. Kadang-kadang digunakan struktur hibrid untuk menggabungkan keuntungan kedua jenis struktur tersebut. Dengan cara demikian dapat diperoleh keuntungan berupa kemampuan berbentang panjang (dari struktur yang ditumpu udara) dan penambahan keamanan terhadap runtuh (dari sistem dinding rangkap).

11.2.3 Struktur Jaring dan Tenda

Untuk struktur-struktur yang mendapat kestabilannya dari gaya-gaya prategang eksternal, penerapan prinsip desain yang mengharuskan tarik permukaan harus dipertahankan, pada umumnya mengandung arti bahwa gaya prategang harus besar dan atau kelengkungan pada permukaan harus dipertahankan besar. Daerah yang luas dan datar pada membran biasanya dihindari karena untuk ini dibutuhkan gaya prategang relatif besar untuk mempertahankan luas tersebut apabila beban normal bekerja padanya. Perlu diingat bahwa apabila *sag* kabel mendekati nol, maka gaya tarik kabel akan menjadi besar tak hingga. Sebaliknya, gaya prategang yang sangat besar diperlukan untuk mempertahankan kabel pada konfigurasi *sag* nol apabila dibebani. Fenomena umum yang sama juga terjadi pada struktur kulit bertegangan.

Luasan datar harus dihindari dengan cara memperhatikan geometri eksak dari permukaan cangkang. Penggunaan model biasanya berguna untuk mempelajari hal tersebut pada taraf desain prarencana.

Besar gaya prategang yang diberikan untuk menstabilkan tidak boleh menyebabkan tegangan membran melebihi kapasitas material yang digunakan. Untuk struktur berbentang besar, biasanya membran terdiri atas *jaring* kabel baja berjarak dekat yang mampu memikul gaya prategang relatif besar.

Masalah desain yang kriti pada membran kulit bertegangan adalah kondisi tumpuan atau tepinya, Penggunaan tumpuan titik, misalnya, dapat menyebabkan terjadinya tegangan lokal yang sangat besar pada membran di titik pertemuan membran dan tumpuan. Ada syarat khusus yang perlu diperhatikan untuk

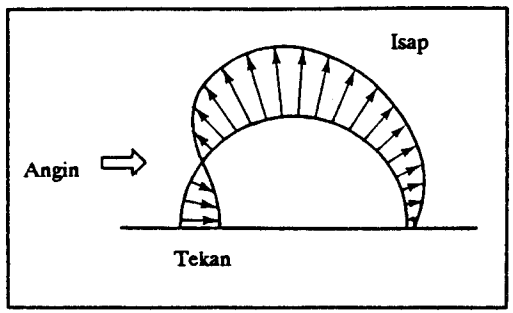
mengatasi hal ini. Salah satu cara adalah dengan menggunakan lubang kecil (eyelet) seperti terlihat pada Gambar 11-13(a). Masalah ini akan dibahas lebih rinci pada Bab 11.4.2

11.3 ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR PNEUMATIS

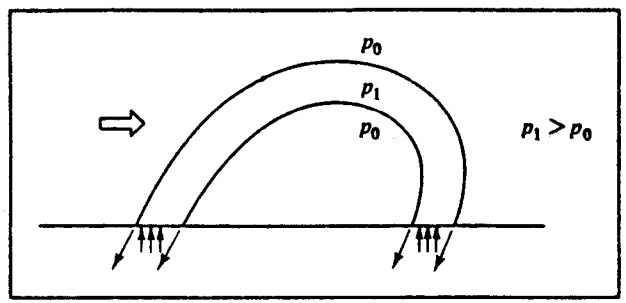
11.3.1 Struktur yang Ditumpu–Udara

Jenis-jenis Pembebanan Eksternal. Pada Bab 3 telah dibahas beban-beban pada gedung yang dapat juga berlaku pada struktur pneumatis. Akan tetapi, ada kondisi unik sehubungan dengan jenis struktur ini yang perlu diperhatikan. Beberapa jenis beban dapat bekerja pada struktur yang ditumpu udara. Salju adalah salah satu beban yang berarah ke bawah. Apabila struktur berupa segmen bola yang hampir membentuk setengah bola, salju hanya berakumulasi di dekat puncak struktur karena di bagian lainnya sudah jatuh menggelincir. Pada segmen-segmen bola yang berprofil relatif rendah, salju dapat menutupi seluruh atap. Memang, salju jarang sampai mempunyai tebal berlebihan karena salju umumnya mengalami penaikan temperatur sebagai akibat pemanasan dalam interior struktur.

Beban-beban terpusat besar yang dapat menimbulkan tegangan lokal yang sangat besar harus dihindari sama sekali, dan apabila ada, harus ada struktur lain untuk mengatasinya. Beban terpusat yang tidak besar, misalnya orang berjalan di atas atap, pada umumnya tidak menimbulkan masalah berarti.



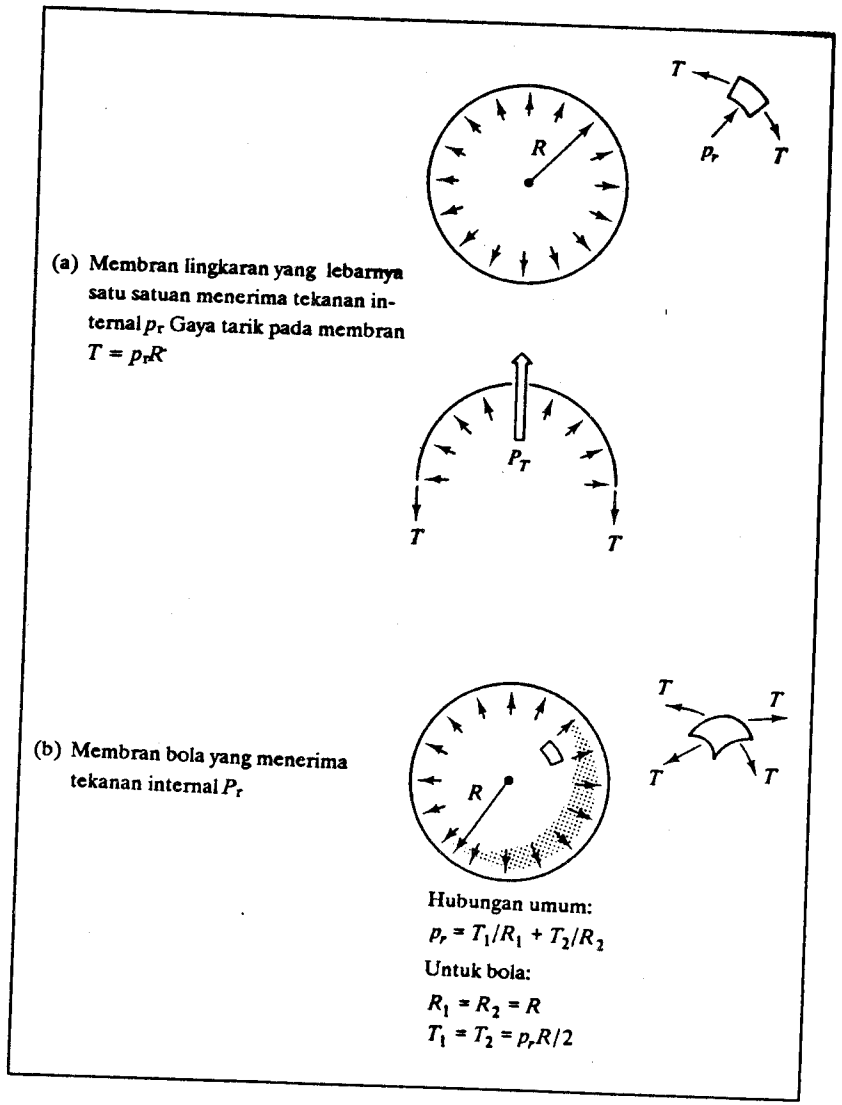
Gambar 11-5 Beban angin pada struktur pneumatis bola



Gambar 11-6 Efek angin pada struktur pneumatis berdinding rangkap

Beban angin merupakan masalah utama. Seperti telah dibahas pada [illegible] beban-beban yang ditimbulkan oleh angin biasanya kompleks dan terdiri atas tekan dan isapan. Gambar 11–5 dan 11–6 mengilustrasikan beban-beban tersebut. Apabila suatu cangkang mengalami gaya isap atau tekan, bergantung pada sudut permukaan cangkang yang digunakan.

Tegangan Membran akibat Tekanan Internal. Gaya-gaya dalam–bidang (in–plane) pada suatu membran yang ditimbulkan oleh tekanan internal bergantung pada dimensi dan bentuk geometris membran selain juga pada besar tekanan internal yang ada.



Gambar 11-7 Tegangan pada membran

Gaya-gaya pada bentuk membran sederhana biasanya mudah ditentukan. Mula-mula tinjaulah cincin planar yang mengalami tekanan internal per satuan luas pr berarah radial ke luar seperti terlihat pada Gambar 11–7. Gaya tarik yang timbul pada cincin itu dapat diperoleh dengan membuat potongan melalui garis tengah cincin dan meninjau keseimbangan translasinya. Efek translasional total dari tekanan pr adalah jumlah dari komponen gaya yang bekerja dalam arah yang ditinjau. Efek total ini sama dengan tekanan internal yang bekerja pada luas terproyeksi dari cincin. Gaya internal total tahanan adalah $2T$ di mana T adalah gaya yang terjadi pada ring. Dengan demikian, $2T = p_r(2R)$ atau $p_r = T/R$ atau $T = p_r R$. Apabila bentuk sebenarnya melengkung pada dua arah, maka ekspresi yang analog dapat ditulis, yaitu $P_r = T_1/R_2 + T_2/R_2$, di mana R_1 dan R_2 adalah jari-jari kelengkungan serta T_1 dan T_2 adalah gaya-gaya dalam-bidang yang saling tegak lurus.

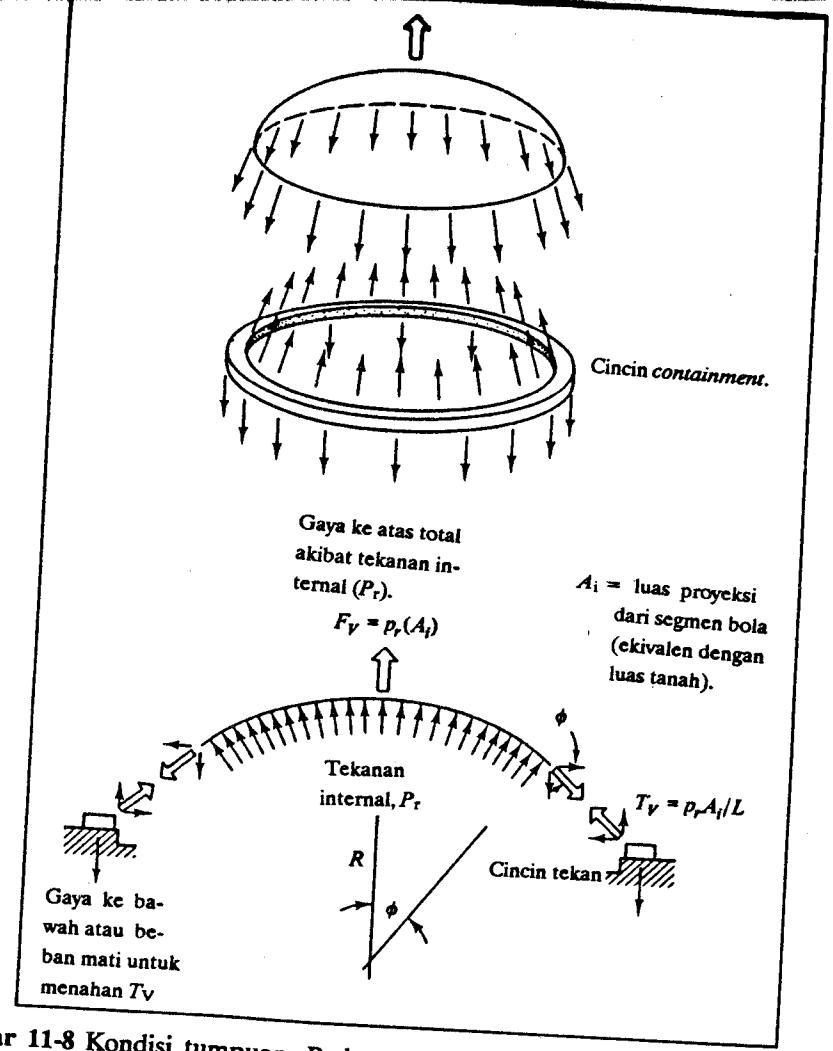
Eskpresi umum berbentuk $P_r = T_1/R_2 + T_2/R_2$ sangat berguna dalam analisis membran. Untuk permukaan silindris, $R_1 = R$ dan $R_2 \to \infty$ *sehingga* $T = prR$. Untuk bola, $R_1 = R_2 = R$ sehingga $T = P_r R/2$. Ini adalah gaya internal yang dinyatakan dalam *gaya per satuan panjang membran* pada bentuk bola yang memikul tekanan internal P_r. Gaya-gaya membran internal dapat dikonversikan menjadi tegangan dengan memperhitungkan tebal membran (jadi, $f = T/tL$ di mana L adalah panjang satu satuan). Ekspresi ini juga akan digunakan dalam analisis secara lebih rinci.

Tekanan Internal yang Dibutuhkan. Ada tekanan internal yang dibutuhkan untuk mencegah membran dari terlipat untuk segala kondisi pembebanan yang mungkin terjadi padanya. Semua titik kritis pada permukaan bola harus dicek untuk memperoleh kombinasi pembebanan yang menyebabkan terjadinya komponen radial terbesar. Titik-titik yang mempunyai komponen radial terbesar inilah yang harus diberi pratekan. Besarnya pemberian pratekan harus sedemikian rupa sehingga tegangan tarik di mana pun pada membran yang dipengaruhi oleh pemberian prategang, tidak boleh melebihi tegangan izin material yang digunakan. Tegangan pada material untuk semua kondisi pembebanan yang mungkin, termasuk juga yang diakibatkan oleh pemberian prategangan internal harus dicek sesudah pemberian prategang internal ditentukan karena kondisi pembebanan parsial dapat mengakibatkan terjadinya efek interaktif yang tak diinginkan.

Pada umumnya, tekanan internal yang diperlukan itu kecil. Tekanan internal sekitar 100 mm (tekanan air) adalah tekanan yang umum terjadi.

Kondisi Tumpuan. Bagaimana struktur yang ditumpu udara bertemu dengan tanah merupakan masalah desain kritis. Ada, misalnya, masalah dalam menjamin agar udara tidak mengalir. Berdasarkan tinjauan struktural (bukan tinjauan *detailing*), bagaimana pun, masalah yang utama adalah struktur ini cenderung mengalami gaya ke atas (uplift) yang besar, bergantung pada bentuk struktur dan gaya horizontal pada tumpuannya.

Perhatikan struktur yang ditumpu udara pada Gambar 11–8. Struktur ini mengalami gaya ke atas $P_r A_i$ di mana A_i adalah luas terproyeksi dari struktur (sama dengan bidang tanah yang tertutupi). Jadi, gaya ke atas sebesar $T_v = P_r A_i/L$ (di mana L adalah keliling cincin di dasar dan T_v dinyatakan dalam gaya per satuan



Gambar 11-8 Kondisi tumpuan. Pada struktur berprofil rendah, tumpuan memikul gaya berarah ke atas dan ke dalam. Pada struktur berprofil tinggi, gaya pada tumpuan mempunyai arah ke atas dan ke luar (untuk $0 > 90^\circ$).

panjang tumpuan) akan timbul pada tumpuan. Perhatikan bahwa apabila membran itu adalah segmen bola, maka $T_v = P_r\ \pi(R\ sin\ \Phi)^2/2\pi R\ sin\ \Phi$ dan $T = T_v/\sin\Phi$. Selain itu, gaya horizontal sebesar $T_v/\tan\Phi$ juga terjadi pada tumpuan. Pada bentuk berprofil rendah, gaya horizontal selalu mempunyai arah ke dalam. Pada kondisi beban tertentu, gaya-gaya lain juga timbul (misalnya gaya ke atas akibat angin).

Fondasi struktur ini harus didesain untuk mampu menahan gaya vertikal ke atas maupun horizontal agar membran tetap terikat pada tanah. Untuk struktur besar, cara yang sering dipakai untuk menahan gata-gaya tersebut adalah menggunakan

cincin *containment* di dasarnya. Pada struktur berprofil rendah, komponen horizontal reaksi membran mempunyai arah ke dalam sehingga cincin *containment* akan mengalami tekan.

Cincin *containment* untuk struktur yang merupakan segmen bola adalah cincin lingkaran. Untuk bentuk membran lain, tujuan desain (meminimumkan momen) mengharuskan penggunaan bentuk cincin yang berupa *funicular* terhadap beban yang ada. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya bentuk cincin yang tidak biasa apabila bentuk mebran juga tidak biasa.

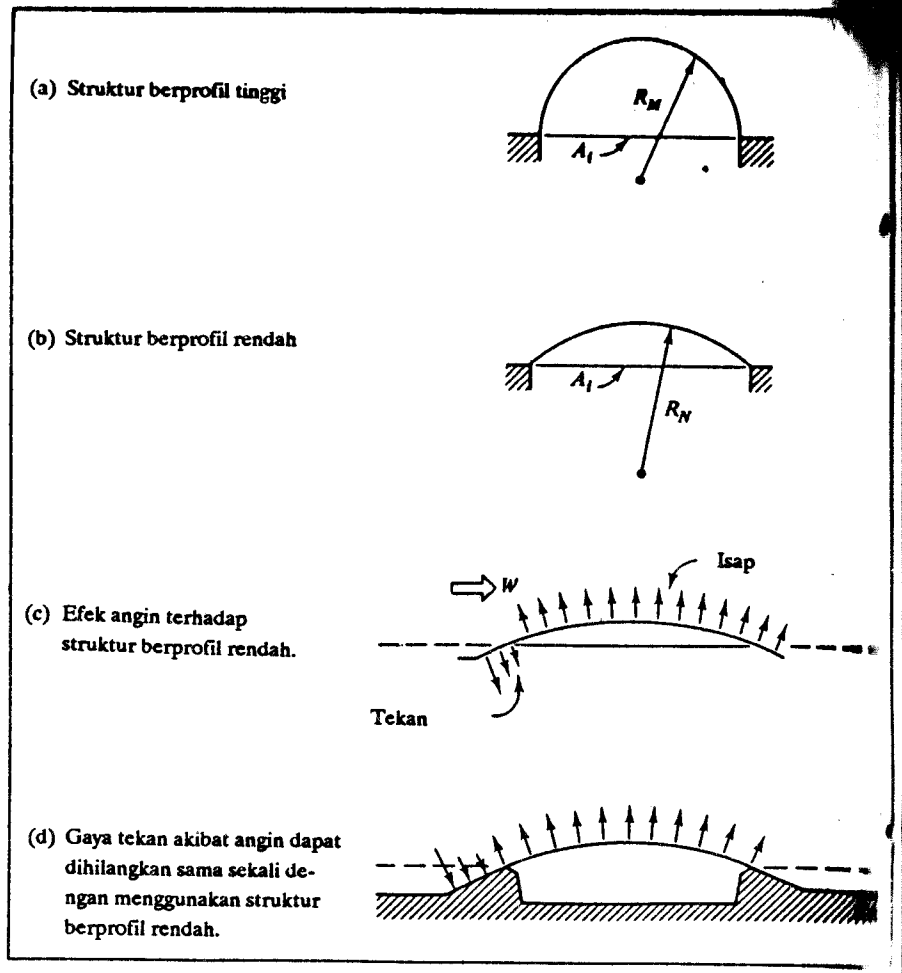
Pada struktur yang ditumpu udara yang mempunyai bentang sangat besar di mana jenis membran jaring kabel harus digunakan, pertemuan antara kabel dengan cincin dapat menimbulkan masalah karena adanya pemusatan tegangan yang sangat besar. Dengan demikian, kita harus berhati-hati dalam menjamin bahwa tegangan lokal yang besar ini tidak melebihi yang diizinkan. Bentuk cincin mungkin juga dipengaruhi oleh sistem kabel primer dan skunder yang digunakan di mana gaya pada cincin sudah tidak dapat disebut terbagi rata.

Profil. Salah satu di antara masalah desain yang berkaitan dengan struktur yang ditumpu udara adalah menentukan profil struktur. Tinjaulah segmen bola berjari-jari R_m yang menutupi tanah seluas A_2 (lihat Gambar 11–9). Tinjau pula segmen bola lain yang jari-jarinya lebih besar, R_N, yang juga menutupi luas tanah yang sama. A_2. Dengan menganggap bahwa masing-masing segmen bola harus mengalami tekanan internal sebesar p untuk memikul beban eksternal, maka jelas bahwa untuk p yang sama, tegangan pada membran yang berjari-jari besar ($T_N = pR_N/2$) lebih besar daripada tegangan pada membran berjari-jari kecil ($T_M = pR_m/2$) (ingat bahwa $R_N > R_M$ dan $T_N > T_M$). Dengan perkataan lain, untuk p yang sama, membran bola berprofil rendah akan mengalami tegangan lebih besar daripada yang berprofil tinggi. Karena pemilihan membran sangat dipengaruhi oleh besar gaya yang ada, maka segmen bola berjari-jari kecil (berprofil tinggi) lebih disukai daripada segmen bola berjari-jari besar (berprofil rendah). Selain itu, pada struktur berprofil rendah terjadi reaksi horizontal yang besar, jadi membutuhkan cincin tekan yang besar.

Tentu saja ada untung-ruginya di antara kedua profil tersebut. Volume gedung besar dan ditutupi oleh struktur berprofil tinggi tentu saja membutuhkan sistem mekanis lebih banyak yang dibutuhkan untuk menjamin kondisi kenyamanan pengguna gedung.

Gaya eksternal akibat efek angin dapat menjadikan struktur berprofil rendah menjadi menguntungkan. Dengan memotong segmen bola pada titik yang terlihat pada Gambar 11–9(c), kita dapat memperoleh kondisi di mana efek angin hanya isapan. Gaya yang menekan mempunyai kecenderungan melipat membran sehingga harus dihindari. Gaya angin isap mempunyai kecenderungan mengangkat atap, bukan menekan ke bawah. Dengan demikian, pemberian tekanan internal juga akan terpengaruh.

Ada contoh-contoh struktur berprofil tinggi maupun berprofil rendah yang ditumpu udara. Hampir semua struktur berbentang panjang mempunyai profil rendah dan menggunakan membran jaring kabel. Struktur berbentang pendek umumnya mempunyai profil tinggi.

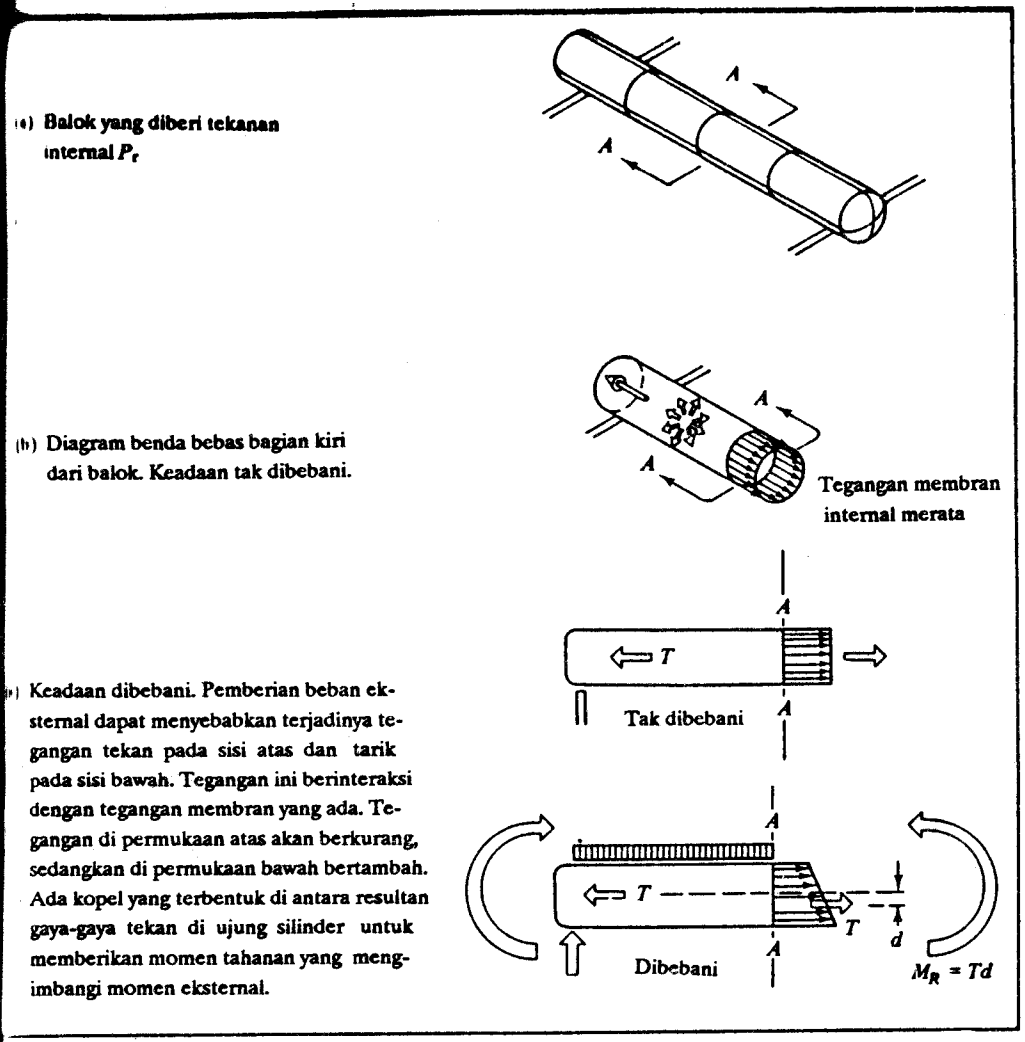


Gambar 11-9 Tinjauan profil

11.3.2 Struktur yang Digelembungkan oleh Udara (Air–Inflated–Structures)

Struktur yang menggunakan elemen yang dikembangkan udara menyalurkan beba eksternal ke tanah dengan cara lebih tradisional dibandingkan dengan struktur ya ditumpu udara. Elemen-elemen yang biasa, misalnya balok, kolom, atau pelengku dibuat kaku dengan memberinya tekanan internal besar.

Perhatikan balok yang digelembungkan udara pada Gambar 11–10 di mana tekanan penggelembung adalah sebesar P_r. Tegangan tarik membran longitudi merata akibat tekanan tersebut akan terjadi pada seluruh panjangnya apabila struktu tidak dibebani. Pemberian beban eksternal cenderung menyebabkan terjadiny



Gambar 11-10 Balok yang dikembangkan (digelembungkan) oleh udara: perilaku memikul-beban secara umum

tegangan di sepanjang permukaan atas dan tegangan tarik di sepanjang permukaan bawah seperti pada balok yang dibuat dari material kaku. Tegangan ini beriteraksi dengan tegangan yang diakibatkan oleh pemberian tekanan. Sebagai akibatnya, tegangan tarik yang semula ada di sepanjang permukaan atas akan berkurang, dan di permukaan bawah bertambah. Jelas bahwa pemberian tekanan internal harus sedemikian besarnya sehingga tidak akan menimbulkan tegangan tekan di seluruh permukaan atas yang dapat mengakibatkan terjadinya lipatan. Distribusi tegangan internal resultan dan gaya tekanan resultan saling membentuk kopel sehingga timbul momen tahanan internal yang mengimbangi momen eksternal. Jadi, jelas bahwa mekanisme pemikul beban pada struktur ini sama dengan yang terjadi pada balok prategang.

Kekakuan pada bentuk lain juga bergantung pada tekanan internal. Bola dinding rangkap, misalnya, dapat berperilaku seperti cangkang tipis kaku, jadi kepekaannya terhadap tekuk juga sama.

Kekakuan semua struktur yang digelembungkan oleh udara sangat bergantung pada tingkat pemberian tekanan internal. Pemberian tekanan ini pada struktur yang digelembungkan udara biasanya lebih besar daripada yang ditumpu udara.

11.3.3 Tinjauan Lainnya

Hal yang sering merupakan masalah pada penggunaan struktur pneumatis adalah apa yang akan terjadi apabila membran berlubang. Dalam hal ini ada gunanya apabila kita membandingkan dua pneumatika, yaitu balon dan struktur yang ditumpu udara.

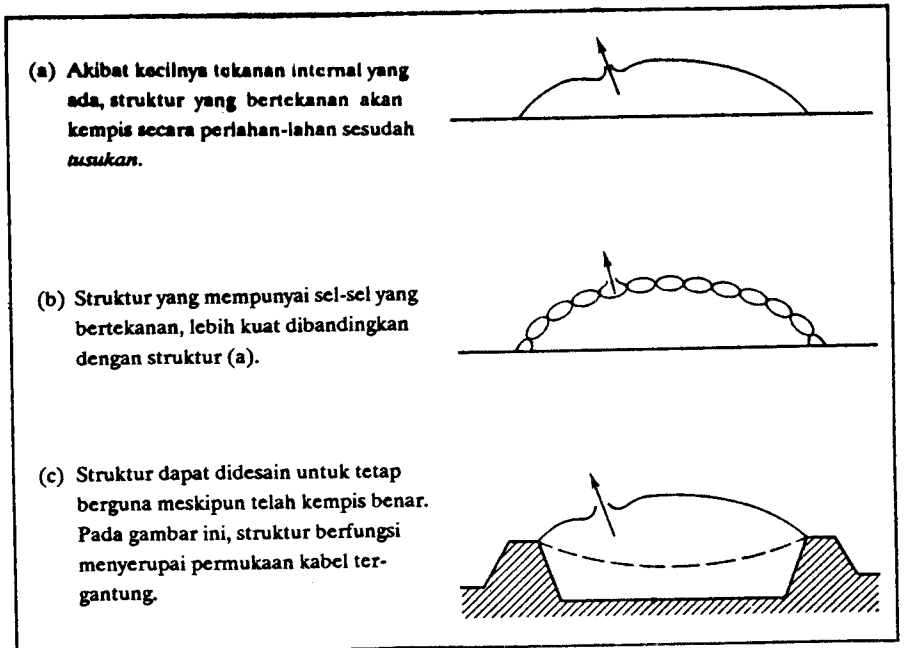
Apabila balon ditusuk, jelas akan meledak. Pada kenyataannya, tusukan menyebabkan terjadinya retak yang akan menjalar secara sangat cepat. Cepatnya penjalaran itu adalah karena sangat besarnya tekanan internal pada balon. Jadi, pada membran pun terdapat keadaan tegangan yang sangat besar. Sangat banyak energi yang disimpan dalam membran bertekanan tinggi. Pada saat retak mulai terjadi semua energi yang disimpan mempercepat penjalaran retak. Pada struktur seperti ini, yang sering disebut *sistem berenergi besar,* retak menjalar dengan sangat cepat. Sebaliknya, gedung pneumatis yang ditumpu udara adalah *sistem berenergi rendah.* Pemberian tekanan internal relatif kecil. Hanya sedikit energi yang disimpan dalam membran. Dengan demikian, retak yang diawali dengan tusukan tidak akan menjalar secara cepat, karena tidak banyak energi tersimpan yang dapat mempercepat penjalaran retak (Gambar 11–11). Sobekan memang terjadi, tetapi efek tusukan (lubang) pada dasarnya dapat dilokalisasi.

Tekanan rendah yang ada pada gedung pneumatis biasanya sedemikian hingga kehilangan tekanan yang diasosiasikan dengan adanya lubang, tidak besar. Sistem mekanis yang digunakan untuk mengembangkan struktur biasanya mempunyai kapasitas cukup untuk mempertahankan bentuk membran meskipun mungkin terjadi lubang kecil.

Sekalipun, misalnya, lubang atap sangat banyak, struktur ini akan turun relatif perlahan-lahan, tidak seketika, sehingga dapat memberikan peringatan lebih dulu kepada pengguna gedung. Keterkejutan memang ada, tetapi bahayanya terhadap kehidupan relatif kecil.

Agar keamanan tetap ada pada saat terjadinya kehilangan tekanan, struktur pneumatis dapat didesain agar berperilaku sebagai atap gantung. Tumpuan-tumpuan biasanya ditinggikan sehingga masih tetap tersedia ruang seandainya deflasi (pengempisan) terjadi.

Masalah penting lain sehubungan dengan struktur pneumatis adalah pemilihan material membran karena banyak jenis material yang menurun mutunya dari waktu ke waktu sebagai akibat efek ultraviolet dari matahari. Masalah ini dapat diatasi dengan pemilihan material yang tepat.



Gambar 11-11 Tusukan (lubang) pada struktur yang dikembangkan (digelebungkan) oleh udara (air-inflated structure)

11.4 ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR TENDA DAN JARING

Analisis rinci mengenai bagaimana struktur tenda dan jaring prategang berperilaku adalah masalah kompleks dan tidak termasuk ke dalam lingkup buku ini. Sekalipun demikian, beberapa prinsip yang mendasarinya telah dibahas pada Bab 5 karena banyak struktur membran yang pada dasarnya merupakan sistem kabel menyilang. Pada bagian ini kita akan membahas beberapa masalah dalam desain struktur tenda dan jaring.

11.4.1 Kelengkungan

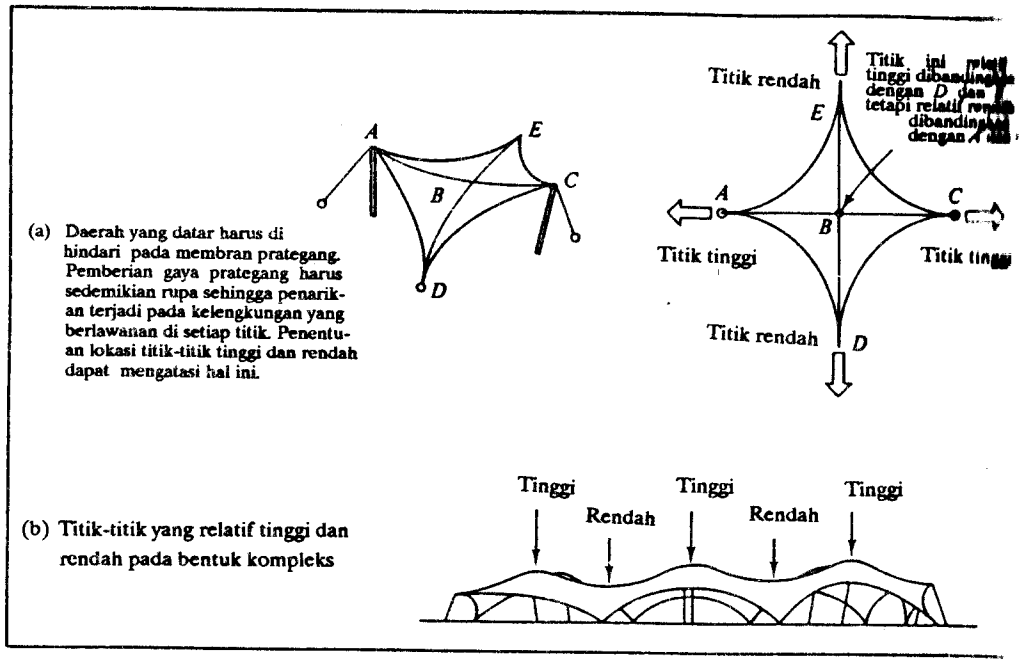
Seperti telah disebutkan terdahulu, kita sebaiknya menghindari penggunaan luasan datar pada permukaan membran karena, apabila digunakan, akan membutuhkan gaya prategang besar untuk mempertahankan bentuknya pada saat dibebani. Jadi diperlukan struktur yang mempunyai kelengkungan besar.

Luasan yang datar umumnya dapat dihindari dengan memperhatikan geometri permukaan. Daerah transisi antara permukaan berkelengkungan negatif dan positif harus diperhatikan dan didesain secara khusus.

Kelengkungan harus dijamin besarnya dengan mengontrol titik-titik tinggi dan rendah. Dua titik tinggi harus dipisahkan oleh satu titik rendah, begitu pula sebaliknya. Prinsip ini jelas terlihat pada struktur empat–titik seperti terlihat pada Gambar

11–12(a). Dua titik tinggi *(A* dan *C)* dipisahkan oleh satu titik yang relatif rendah *(B).* Sedangkan titik *B* ini relatif lebih tinggi daripada dua titik lainnya *(D* dan *E).* Dengan demikian, permukaan yang menghubungkan titik-titik *A, C, D,* dan *E* adalah permukaan berkelengkungan ganda. Apabila perbedaan tinggi antara *A, D, E,* dan *B* cukup besar, maka permukaan tersebut mempunyai kelengkungan relatif tajam (besar). Tentu saja, apabila semua titik terletak pada tingkat sama, permukaan tersebut relatif datar.

Prinsip pemisahan titik tinggi dan titik rendah dapat pula diterapkan pada membran yang lebih kompleks seperti terlihat pada Gambar 11–12(b).



(a) Daerah yang datar harus dihindari pada membran prategang. Pemberian gaya prategang harus sedemikian rupa sehingga penarikan terjadi pada kelengkungan yang berlawanan di setiap titik. Penentuan lokasi titik-titik tinggi dan rendah dapat mengatasi hal ini.

(b) Titik-titik yang relatif tinggi dan rendah pada bentuk kompleks

Gambar 11-12 Kelengkungan pada membran pratarik

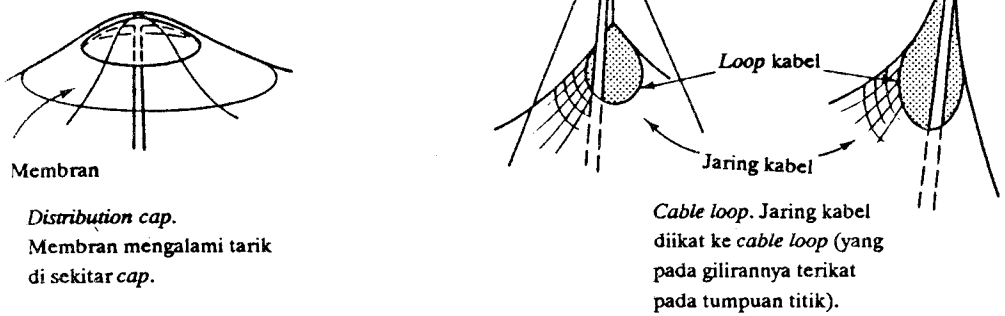
11.4.2 Kondisi Tumpuan

Banyak struktur membran yang ditumpu oleh sederetan titik tumpuan diskret. Titik tinggi utama biasanya dibentuk dengan menggunakan kepala *(masts)* tekan yang cukup besar. *Masts* seperti ini didesain sebagai kolom besar yang hampir selalu berujung sendi. Titik rendah utama biasanya dihubungkan ke tanah. Gaya vertikal ke atas dan horizontal yang besar biasanya terjadi pada fondasinya karena gaya prategang pada membran diperoleh dengan menarik menbran, dengan menggunakan cara *jacking,* di antara titik tinggi dan titik pengikat–ke–bawah. Karena ada gaya terpusat yang sangat besar, maka hubungan pada titik pengikat–ke–bawah merupakan masalah utama dalam desain.

Banyak dan penentuan letak titik tumpuan umumnya menentukan besar gaya yang ada pada titik hubung di tanah atau pada *mast.* Bagaimana pun, kita tidak perlu membuat tumpuan terlalu banyak agar kita dapat memperoleh kelengkungan membran yang cukup.

Kekecualian mengenai jenis kondisi tumpuan titik utama untuk struktur membran adalah di tepi bebas dari membran prategang (lihat Gambar 11–13). Kabel tepi sering digunakan untuk **memperkaku tepi** bebas dan memberikan tarik merata pada membran itu sendiri (dengan memberi tarik pada seluruh tepi permukaan). Gaya-gaya pada kabel tepi ini biasanya cukup besar.

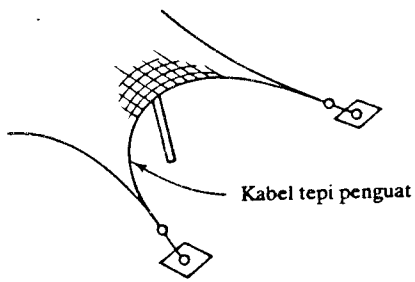
Karena tegangan membran lokal yang akan terjadi di permukaan yang di atas titik tinggi akan sangat besar, maka celah seperti terlihat pada Gambar 11–13 digunakan untuk mengurangi tegangan membran (dengan membuka permukaan di titik



Distribution cap. Membran mengalami tarik di sekitar *cap.*

Cable loop. Jaring kabel diikat ke *cable loop* (yang pada gilirannya terikat pada tumpuan titik).

(a) Cara-cara alternatif untuk mengurangi gaya-gaya pada membran di sekitar tumpuan diskret



(b) Kondisi tepi pada struktur jaring kabel

Gambar 11-13 Kondisi batas pada membran pratarik

tersebut dan menggunakan cincin kabel). Membran itu terikat pada cincin yang akan mendistribusikan gaya internal secara lebih rata ke tumpuan-tumpuan titik. Cincin tersebut, pada gilirannya, dihubungkan dengan *mast.*

11.4.3 Tinjauan Lainnya

Permukaan berkelengkungan ganda bukan saja menimbulkan kesulitan teoretis, melainkan juga kesulitan pelaksanaan. Biasanya permukaan demikian dibuat dari jalur-jalur berbentuk tidak merata yang dipotong secara khusus. Penentuan bentuk jalur ini merupakan masalah tersendiri. Masalah analog juga timbul apabila suatu jaring kabel digunakan untuk struktur berbentang panjang. Bentuk grid kecil yang dibentuk, tentu saja, tidak selalu berbentuk bujursangkar atau segiempat, tetapi bentuk-bentuk yang sangat bervariasi. Karena itulah penentuan panjang kabel dan lokasi titik persilangan merupakan masalah yang perlu diperhatikan.

Masalah-masalah di atas memang dapat saja dipecahkan, tetapi tentu hal ini mempengaruhi kebebasan dalam memilih bentuk struktur membran prategang. Dalam banyak hal, pemilihan ini ditentukan dengan menggunakan studi model dengan membran yang mudah memanjang, misalnya lembaran karet, sehingga mudah berdeformasi ke segala arah. Pembuatan suatu bentuk dari material yang sebenarnya tidak dapat memanjang dengan bebas, pada dasarnya tidak konsisten, tetapi merupakan hal yang penting.

SOAL

11–1 Suatu balok bola mempunyai jari-jari 12 in, dan tebal 0,05 in. Balok tersebut ditiup dengan tekanan internal 100 lb/in.^{2}. Berapakah tegangan membran yang terjadi pada permukaan balon?

11–2 Bagaimana struktur pneumatis yang bertekanan internal ditumpu ke tanah merupakan masalah dalam desain dan konstruksi. Buatlah paling sedikit satu sketsa yang memperlihatkan detail hubungan tersebut. Carilah literatur yang membahas hal ini.

11–3. Dengan menggunakan informasi dari literatur yang ada, buatlah beberapa sketsa yang memperlihatkan bagaimana struktur kabel atau kulit yang bertegangan dihubungkan ke kepala *(masts)* kabel.

11–4. Bagaimana struktur tenda prategang diikat ke tanah merupakan masalah konstruksi dan desain kritis. Buatlah beberapa sketsa sistem penjangkaran ke tanah yang dapat dipakai untuk memikul beban tarik. Carilah literatur mengenai hal ini.

Bab 12

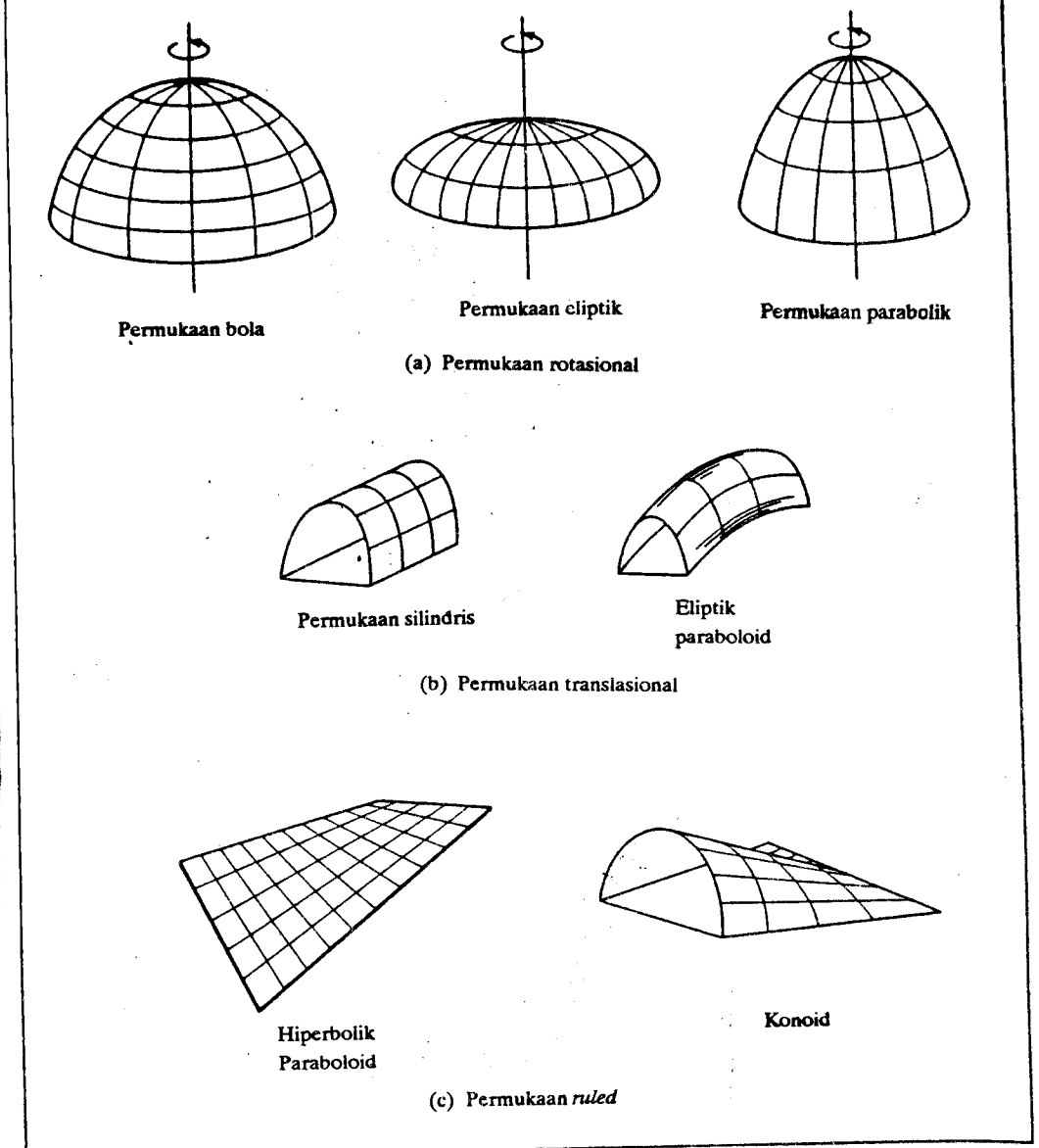
STRUKTUR CANGKANG

12.1 PENDAHULUAN

Cangkang adalah bentuk struktural tiga dimensional yang kaku dan tipis yang mempunyai permukaan lengkung. Permukaan cangkang dapat mempunyai sembarang bentuk. Bentuk yang umum adalah permukaan yang berasal dari kurva yang diputar terhadap satu sumbu (misalnya, permukaan bola, elips, kerucut, dan parabola), permukaan translasional yang dibentuk dengan menggeserkan kurva bidang di atas kurva bidang lainnya (misalnya permukaan parabola eliptik dan silindris), permukaan yang dibentuk dengan menggeserkan dua ujung segmen garis pada dua kurva bidang (misalnya permukaan hiperbolik paraboloid dan konoid), dan berbagai bentuk yang merupakan kombinasi dari yang telah disebutkan di atas (Gambar 12–1). Bentuk cangkang tidak harus selalu memenuhi persamaan matematis sederhana. Segala bentuk cangkang mungkin saja digunakan untuk suatu struktur. Bagaimana pun, tinjauan konstruksional mungkin membatasi hal ini.

Beban-beban yang bekerja pada permukaan cangkang diteruskan ke tanah dengan menimbulkan tegangan geser, tarik, dan tekan pada arah dalam-bidang (in-plane) permukaan tersebut. Tipisnya permukaan cangkang menyebabkan tidak adanya tahanan momen yang berarti. Struktur cangkang tipis khususnya cocok digunakan untuk memikul beban terbagi rata pada atap gedung. Struktur ini tidak cocok untuk memikul beban terpusat.

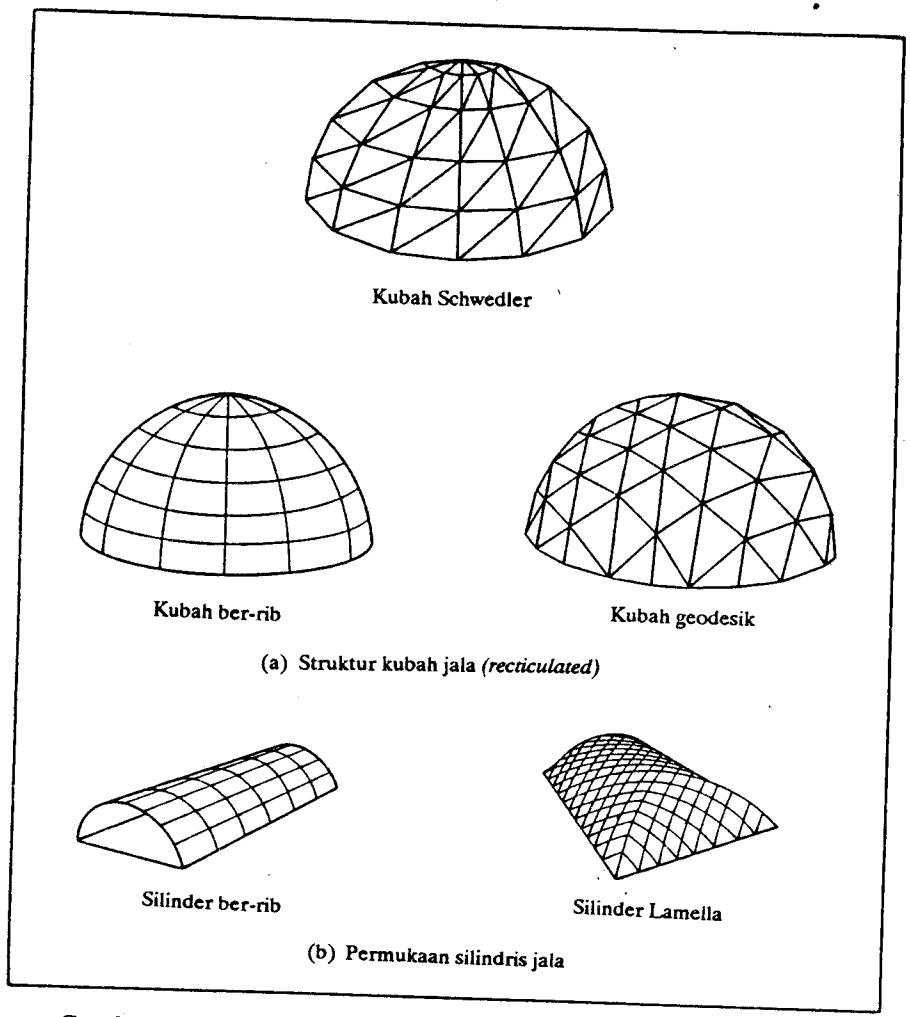
Sebagai akibat cara elemen struktur ini memikul beban dalam-bidang (terutama dengan cara tarik dan tekan), struktur cangkang dapat sangat tipis dan mempunyai bentang relatif besar. Perbandingan bentang–tebal sebesar 400 atau 500 dapat saja digunakan [misalnya tebal 3 in. (8 cm) mungkin saja digunakan untuk kubah yang berbentang 100 sampai 125 ft (30 sampai 38 m)]. Cangkang setipis ini menggunakan



Gambar 12-1 Contoh-contoh berbagai jenis permukaan cangkang menerus

material yang relatif baru dikembangkan, misalnya beton bertulang yang didesain khusus untuk membuat permukaan cangkang. Bentuk-bentuk tiga dimensional lain, misalnya kubah pasangan (bata), mempunyai ketebalan lebih besar, dan tidak dapat dikelompokkan sebagai struktur yang hanya memikul tegangan dalam-bidang karena, pada struktur tebal seperti ini, momen lentur sudah mulai dominan.

Bentuk-bentuk tiga dimensional juga dapat dibuat dari batang-batang kaku dan pendek (Gambar 12–2). Struktur seperti ini pada hakikatnya adalah struktur cangkang karena perilaku strukturalnya dapat dikatakan sama dengan permukaan cangkang menerus, hanya saja tegangannya tidak lagi menerus seperti pada permukaan cangkang, tetapi terpusat pada setiap batang. Struktur demikian baru pertama kali digunakan pada awal abad XIX. *Kubah Schwedler*, yang terdiri atas jaring-jaring batang bersendi tak teratur, misalnya, diperkenalkan pertama kali oleh Schwedler di Berlin pada tahun 1863, pada saat ia mendesain kubah dengan bentang 132 ft (48 m). Struktur baru yang lain adalah yang menggunakan batang-batang yang diletakkan pada kurva yang dibentuk oleh garis membujur dan melintang dari suatu permukaan putar. Banyak kubah besar di dunia ini yang menggunakan cara demikian.



Gambar 12-2 Beberapa contoh permukaan jala (reticulated surface)

Untuk menghindari kesulitan konstruksi yang ditimbulkan dari penggunaan batang-batang yang berbeda dalam membentuk permukaan cangkang, kita dapat menggunakan cara-cara lain yang menggunakan batang-batang yang panjangnya sama. Salah satu di antaranya adalah *kubah geodesik* yang diperkenalkan oleh Buckminster Fuller. Karena permukaan bola tidak dapat dibuat, maka banyaknya pola berulang identik yang akan dipakai untuk membuat bagian dari permukaan bola itu terbatas. *Icosohedron* bola, misalnya, terdiri atas 20 segitiga yang dibentuk dengan menghubungkan lingkaran-lingkaran besar yang mengelilingi bola. Tinjauan geometris demikian inilah yang digunakan oleh Fuller. Kita harus berhati-hati dalam menggunakan cara seperti ini karena sifat strukturnya dapat membingungkan. Keuntungan struktural yang didapat tidak selalu lebih besar daripada bentuk kubah lainnya.

Bentuk-bentuk lain yang bukan merupakan permukaan putaran juga dapat dibuat dengan menggunakan elemen-elemen batang. Beberapa di antaranya adalah atap *barrel* ber-rib dan *atap Lamella* yang terbuat dari grid miring seperti pelengkung yang membentuk elemen-elemen diskret. Bentuk yang disebut terakhir ini dari material kayu sangat banyak dijumpai, tetapi baja maupun beton bertulang juga dapat digunakan. Dengan sistem lamella, kita dapat mempunyai bentang yang sangat besar.

12.2 PRINSIP–PRINSIP UMUM

12.2.1 Aksi Membran

Cara yang baik untuk mempelajari perilaku permukaan cangkang yang dibebani adalah memandangnya sebagai analogi dari membran, yaitu elemen permukaan yang sedemikian tipisnya hingga hanya gaya tarik yang timbul padanya (lihat Bab 11). Gelembung sabun atau lembaran tipis dari karet adalah contoh-contoh membran. Membran yang memikul beban tegak lurus dari permukaannya akan berdeformasi secara tiga dimensional disertai terjadinya gaya tarik pada permukaan membran. Aksi pikul bebannya serupa dengan yang ada pada sistem kabel menyilang. Mekanisme pikul beban dasar dari cangkang kaku yang geometrinya sama, analog dengan yang ada pada membran terbalik. Yang penting adalah adanya dua kumpulan gaya internal pada permukaan membran yang mempunyai arah saling tegak lurus. Hal yang juga penting adalah adanya tegangan geser tangensial pada permukaan membran, yang juga berfungsi memikul beban.

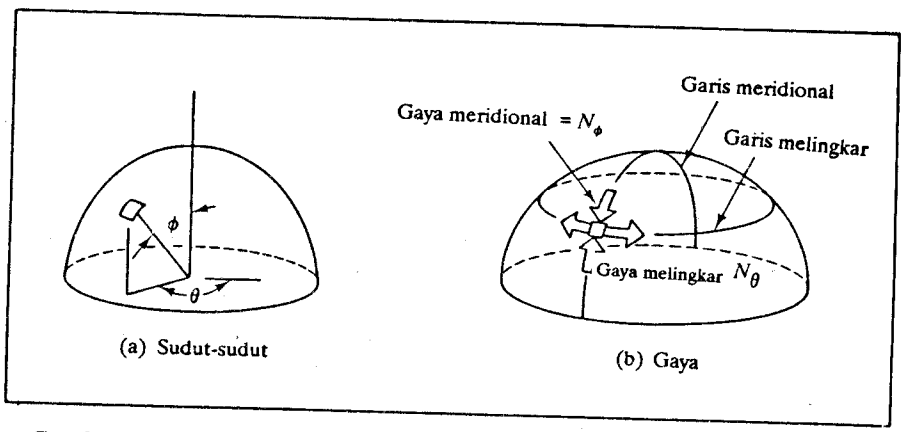
12.2.2 Struktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Rotasional

Adanya dua kumpulan gaya pada arah yang saling tegak lurus di dalam permukaan cangkang menjadikan cangkang berperilaku seperti struktur plat dua arah. Gaya geser yang bekerja di antara jalur-jalur plat yang bersebelahan pada struktur plat planar mempunyai kontribusi dalam memberikan kapasitas pikul beban plat. Hal yang sama juga terjadi pada struktur cangkang.

Adanya dua karakteristik inilah, yaitu adanya gaya geser dan dua kumpulan gaya aksial, yang membedakan perilaku struktur cangkang dan perilaku struktur yang dibentuk dari pelengkung yang dirotasikan terhadap satu titik hingga didapat bentuk seperti cangkang. Pada pelengkung tidak ada momen lentur apabila bentuk pelengkungnya adalah *funicular* untuk beban tersebut.
Apabila beban yang bekerja hanya sebagian (parsial), pada pelengkung akan timbul momen lentur.

Pada cangkang, gaya-gaya dalam-bidang (in-plane forces) yang berarah meridional (disebut *gaya meridional*, lihat Gambar 12–3) diakibatkan oleh beban penuh. Ini sama dengan yang terjadi pada pelengkung analoginya. Pada kondisi beban sebagian, bagaimana pun, aksi cangkang sangat berbeda dengan yang terjadi pada pelengkung karena pada cangkang ada aksi dalam arah melingkar. Gaya melingkar (hoop forces) ini berarah tegak lurus dengan gaya meridional. Gaya melingkar menahan jalur meridional dari gerakan ke arah keluar-bidang yang cenderung terjadi untuk kondisi pembebanan sebagian (lentur pada pelengkung terjadi disertai gerakan seperti ini). Pada cangkang, tekanan yang diberikan oleh gaya-gaya melingkar tidak menyebabkan timbulnya momen lentur dalam arah meridional (juga dalam arah melingkar untuk kasus ini). Dengan demikian, cangkang dapat memikul variasi beban cukup dengan tegangan-tegangan dalam-bidang. Geser plat yang telah disebutkan di atas juga memberikan kontribusi dalam memikul beban.

Variasi pola beban yang ada, bagaimana pun, harus merupakan transisi perlahan (perubahan halus dari kondisi beban penuh ke kondisi sebagian agar momen lentur tidak timbul. Diskontinuitas tajam pada pola beban (misalnya beban terpusat) dapat menyebabkan timbulnya momen lentur. Pada pelengkung, beban seperti ini dapat menimbulkan tegangan lentur yang sangat besar, sedangkan pada cangkang, lentur dengan cepat dihilangkan dengan adanya aksi melingkar. Jadi, beban yang sembarang pada pelengkung, misalnya gangguan tepi yang diasosiasikan dengan tumpuan-tumpuannya, dapat menyebabkan timbulnya momen lentur di seluruh bagian pelengkung. Pada cangkang, hal ini dapat dilokalisasi.

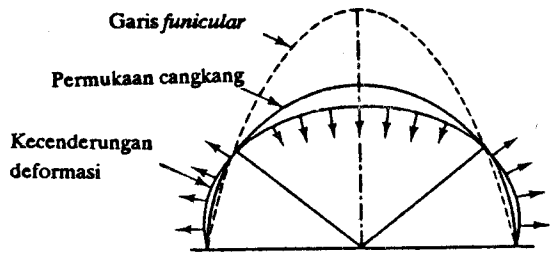


(a) Sudut-sudut (b) Gaya

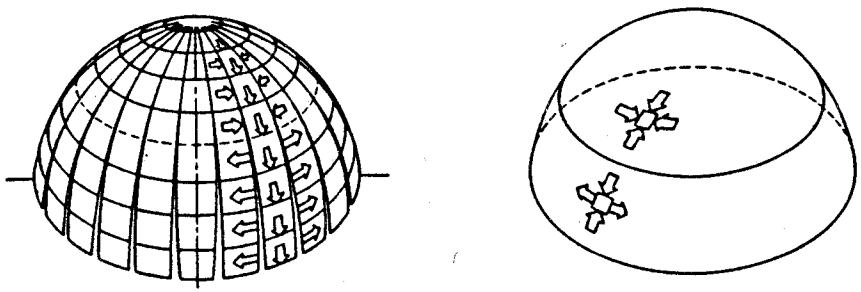
Gambar 12-3 Gaya aksial dalam-bidang (in-plane) pada cangkang bola tipis

Cangkang adalah struktur yang unik. Cangkang dapat disebut bekerja secara *funicular* untuk banyak jenis beban yang berbeda meskipun bentuknya tidak benar-benar *funicular*. Pada contoh yang telah dibahas di atas, bentuk *funicular* untuk pelengkung yang memikul beban terbagi rata adalah parabolik. Cangkang berbentuk segmen bola (tidak parabolik) dapat juga memikul beban hanya dengan gaya-gaya dalam-bidang. Dalam hal ini gaya melingkar terjadi, meskipun bebannya penuh, karena bentuk strukturnya tidak benar-benar *funicular*.

Gaya meridional pada cangkang yang mengalami beban vertikal penuh selalu adalah gaya tekan (analog dengan gaya yang terjadi pada pelengkung). Sedangkan gaya melingkar dapat berupa tarik maupun tekan, bergantung pada lokasi cangkang yang ditinjau (lihat Gambar 12–4). Pada cangkang setengah lingkaran, atau cangkang



(a) Hubungan antara garis-garis permukaan segmen cangkang bola, kecenderungan deformasi permukaan akibat beban terbagi rata, dan garis *funicular* untuk beban yang sama



(b) Gaya melingkar adalah tekan di daerah atas segmen bola dan tarik di daerah bawah. Gaya meridional selalu tekan.

Gambar 12-4 Gaya meridional dan melingkar pada cangkang bola

tinggi, ada kecenderungan pada jalur meridional bawah untuk berdeformasi ke arah luar. Jadi, jelas gaya-gaya melingkar yang terjadi adalah tarik. Di dekat puncak cangkang tersebut, jalur meridional cenderung berdeformasi ke dalam, yang berarti gaya melingkarnya adalah tekan.

Tegangan yang diasosiasikan dengan gaya melingkar dan meridional umumnya kecil untuk kondisi beban terbagi rata. Beban terpusat pada umumnya menyebabkan terjadinya tegangan yang sangat besar, karena itu sebaiknya dihindari pada permukaan cangkang.

Tinjauan desain utama pada cangkang putar (shell of revolution) adalah masalah di tumpuannya atau di tepi-tepinya. Sama halnya dengan penggunaan batang pengikat pada pelengkung (untuk menahan gaya horizontal), kita juga harus melakukan cara-cara khusus untuk mengatasi gaya *tendangan* horizontal yang diasosiasikan dengan gaya dalam-bidang di tepi bawah cangkang. Pada kubah, misalnya, sistem penyokong melingkar perlu digunakan. Alternatif lain adalah menggunakan cincin lingkaran, yang disebut *cincin tarik*, di dasar kubah sehingga dapat menahan komponen keluar dari gaya meridional. Karena gaya yang disebut terakhir ini selalu tekan, maka komponen horizontal selalu berarah ke luar. Karena itulah cincin *containment* selalu mengalami gaya tarik. Seandainya pada puncak cangkang terdapat lubang, maka komponen gaya meridional di dasar cangkang akan berarah ke dalam sehingga gaya pada cincin adalah gaya tekan.

Lubang pada permukaan cangkang seperti disebutkan di atas mungkin saja ada, tetapi sebaiknya dihindari karena hal ini mengganggu kontinuitas juga mengurangi efisiensi permukaan cangkang. Apabila memang harus ada lubang, cangkang harus secara khusus diperkuat di tepi lubang tersebut.

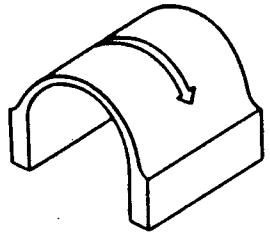
Masalah lain pada desain cangkang adalah derajat kelengkungannya. Pada cangkang berprofil rendah, atau yang permukaannya relatif datar, permukaannya mudah mengalami tekuk ke dalam. Tekuk adalah jenis keruntuhan yang termasuk ke dalam masalah stabilitas, sama halnya dengan kolom langsing panjang. Tekuk dapat terjadi secara lokal (hanya pada sebagian kecil permukaan cangkang), dapat pula terjadi secara menyeluruh. Cangkang dengan kelengkungan besar relatif lebih sulit mengalami tekuk, karena itulah sebaiknya cangkang yang demikianlah yang digunakan.

12.2.3 Struktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Translasional

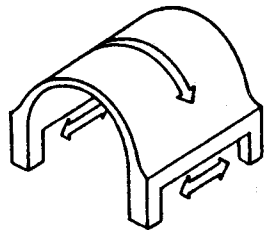
Perilaku bentuk-bentuk struktural yang didefinisikan oleh permukaan-permukaan translasional sangat dipengaruhi oleh proporsi relatif cangkang dan kondisi tumpuannya.

Perhatikan permukaan silindris yang terletak di atas dinding seperti terlihat pada Gambar 12–5(a). Struktur ini, yang umum disebut *terowongan (vault)*, dapat dipandang sebagai permukaan yang terdiri atas sederetan pelengkung sejajar asalkan dinding penumpu tersebut dapat memberikan reaksi yang diperlukan. Apabila permukaan itu kaku (misalnya terbuat dari beton bertulang), maka permukaan tersebut juga dapat menunjukkan aksi plat (ada gaya geser di antara jalur-jalur yang bersebelahan) yang dibutuhkan dalam memikul beban tidak merata. Jenis aksi

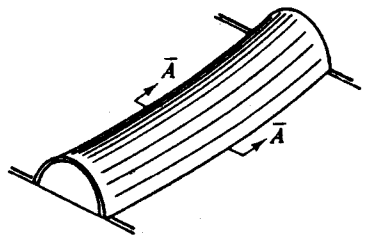
(a) Terowongan: Terowongan ditumpu menerus di sepanjang tepi longitudinalnya. Gaya transversal internal mempunyai perilaku seperti aksi pelengkung.



(b) Cangkang pendek dengan balok tepi kaku: Balok tepi pada dasarnya berfungsi seperti dinding-pada terowongan apabila cukup kaku. Aksi seperti pelengkung meneruskan beban permukaan ke balok. Balok ini memikulnya secara melentur dan meneruskan ke tumpuannya.



(c) Cangkang *barrel* panjang: Apabila cangkang tidak mempunyai balok tepi kaku, maka aksi seperti pelengkung tidak dapat timbul pada arah transversal. Oleh karena itu, beban dipikul dengan aksi lentur yang serupa dengan yang ada pada balok.



Gambar 12-5 Cangkang silindris

yang sama juga akan terjadi apabila permukaan dipikul oleh balok yang sangat kaku. Balok ini pada gilirannya meneruskan beban ke tumpuannya secara melentur.

Perilaku cangkang yang sangat pendek, sangat berbeda dengan perilaku cangkang yang telah disebutkan di atas apabila pengaku ujung tranversal digunakan. Beban permukaan dapat diteruskan secara langsung ke pengaku-pengaku ujung secara aksi plat longitudinal.

Pada cangkang yang panjang dibandingkan dengan bentang tranversalnya ada aksi yang sangat berbeda dengan cangkang pendek, khususnya apabila balok tepi tidak digunakan, atau apabila digunakan, balok tersebut sangat fleksibel. Perlu diingat bahwa setiap balok tepi akan menjadi fleksibel apabila panjangnya bertambah. Dengan demikian, cangkang silindris akan mulai *cenderung* berperilaku seperti pelengkung dalam arah transversal. Balok tepi fleksibel (atau tidak ada balok tepi) tidak dapat memberikan tahanan terhadap gaya *tendangan* horizontal). Sebagai akibatnya, tidak ada aksi seperti-pelengkung pada arah ini. Hal ini berarti apabila tidak ada balok tepi, tepi bebas longitudinal akan berdefleksi ke arah dalam, bukan ke luar, pada kondisi beban penuh. Oleh karena itu, harus ada jenis lain mekanisme pikul beban. Struktur seperti ini disebut *cangkang barrel*. Aksi utama pada cangkang demikian adalah dalam arah longitudinal, bukan transversal. Lentur longitudinal terjadi dan analog dengan yang terjadi pada balok sederhana atau plat lipat. Tegangan tekan pada arah longitudinal dapat terjadi di dekat puncak dari permukaan lengkung, dan tegangan tarik di bagian bawah.

Analogi dengan struktur plat lipat sangat berguna karena banyak prinsip desain yang sama. Pengaku transversal, misalnya, sangat berguna dalam meningkatkan kapasitas pikul beban cangkang *barrel*. Jika semakin banyak pengaku digunakan, atau apabila cangkang *barrel* yang ditinjau merupakan satu di antara sederetan cangkang yang bersebelahan, maka perilaku seperti-balok akan semakin nyata sehingga cara-cara analisis yang biasa dipakai pada balok dapat digunakan. Cangkang *barrel* yang panjangnya sekitar tiga kali (atau lebih) dari bentang transversalnya dapat menunjukkan perilaku longitudinal dengan jelas.

12.2.4 Struktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Ruled

Permukaan *ruled* biasanya membutuhkan analisis yang lebih rumit. Pada umumnya, perilaku cangkang demikian dapat dipelajari dengan memandangnya sebagai kelengkungan yang dibentuk dari garis-garis lurus. Apabila kondisi tepi dapat memberikan tahanan (misalnya dengan menggunakan fondasi atau balok tepi yang sangat kaku), akan ada aksi seperti pelengkung di daerah yang cembung, dan aksi seperti-kabel di daerah yang cekung. Adanya gaya tekan atau tarik pada permukaan tersebut bergantung pada aksi yang ada. Apabila permukaan mempunyai kelengkungan kecil, maka aksi plat (momen lentur dominan) akan ada, yang berarti membutuhkan penampang yang lebih tebal. Apabila tepi cangkang tidak ditumpu, maka perilaku balok dapat terjadi.

Permukaan *ruled* yang dibuat dengan menggerakkan dua ujung dari suatu garis lurus pada dua garis lurus sejajar, tetapi terpuntir (jadi bukan bentuk yang kompleks), diperlihatkan pada Gambar 12–6. Bentuk ini dapat dipandang pula

sebagai permukaan translasional yang dibentuk dengan menggerakkan parabola cekung pada parabola cembung. Struktur seperti ini menunjukkan aksi seperti-pelengkung pada arah kelengkungan cembung dan aksi seperti–kabel pada arah cekung (tegak lurus dari arah cembung). Dengan demikian, medan tegangan pada plat adalah tarik pada satu arah dan tekan pada arah tegak lurusnya. Kedua arah ini membentuk sudut 45° dengan garis lurus pembentuk cangkang tersebut.

12.3 ANALISIS DAN DESAIN CANGKANG BOLA

12.3.1 Gaya-gaya Meridional

Tegangan dan gaya internal pada cangkang aksisimetris yang dibebani terbagi rata dapat diperoleh secara mudah dengan menggunakan persamaan keseimbangan dasar. Sebagai contoh, kita akan menganalisis kubah secara rinci.

Perhatikan segmen kubah seperti terlihat pada Gambar 12–7. Anggap bahwa struktur ini menerima beban mati yang berasal dari berat sendiri cangkang dan lapisan penutupnya. Apabila beban mati total tersebut kita sebut W dan gaya internal dalam-bidang per satuan panjang yang ada pada permukaan cangkang adalah N_ϕ, maka tinjauan keseimbangan akan menghasilkan ekspresi sebagai berikut:

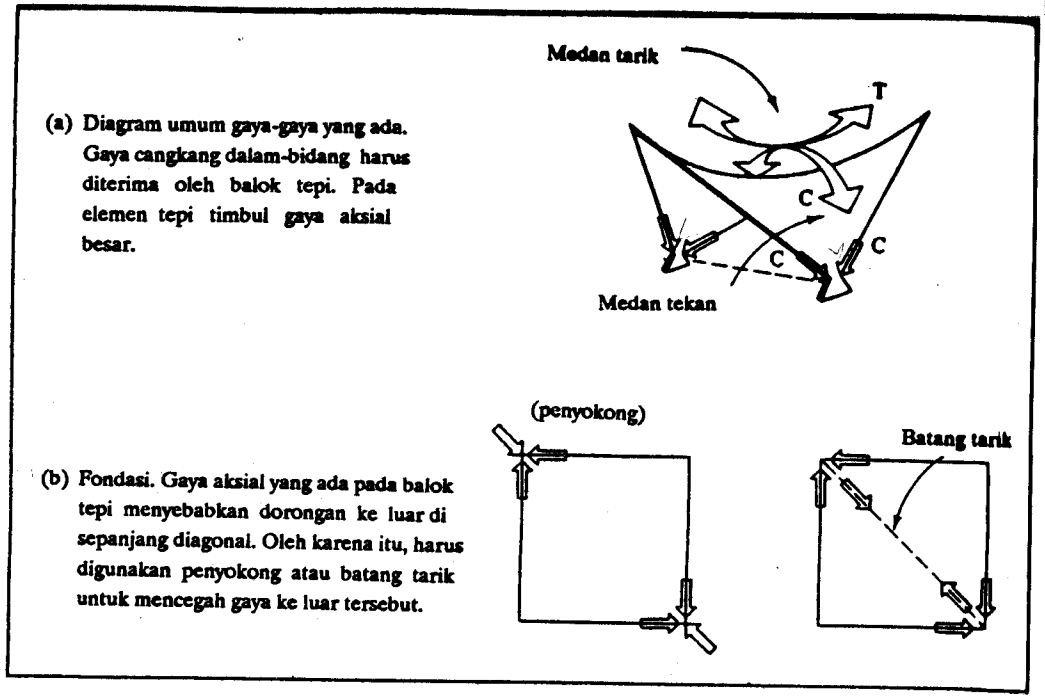
$$\Sigma F_v = 0:$$

$$W = (N_\phi \sin \phi)(2\pi a)$$

di mana ϕ adalah sudut yang mendefinisikan potongan cangkang dan a adalah jari-jari kelengkungan sesaat di titik tersebut. Gaya N_ϕ pada cangkang adalah gaya tekan dalam-bidang yang terjadi pada potongan horizontal yang didefinisikan dengan ϕ. Komponen vertikal dari gaya ini (dianggap merata pada keliling cangkang) adalah $N_\phi \sin \phi$. Karena gaya N_ϕ dinyatakan sebagai gaya per satuan panjang (misalnya lb/ft atau kN/m) di sepanjang potongan, maka gaya total yang diasosiasikan dengan N_ϕ adalah keliling potongan (diberikan oleh $2\pi a$) dikalikan dengan $N_\phi \sin \phi$ (atau, dengan perkataan lain, panjang total dikalikan dengan gaya per satuan panjang menghasilkan gaya total). Gaya ke atas ini harus sama besar dengan gaya ke bawah yang ada, jadi $W = N_\phi \sin \phi (2\pi a)$. Ekspresi ini dapat dinyatakan pula dalam jari-jari aktual bola dengan menggunakan hubungan $a = R \sin \phi$. Jadi, $W = N\phi \sin \phi (2\pi R \sin \phi)$. Dengan demikian, kita peroleh:

$$N_\phi = \frac{W}{2\pi R \sin^2 \phi}$$

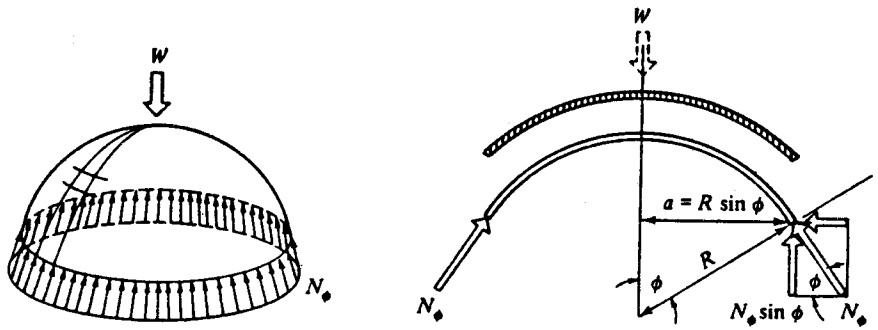
Apabila beban total yang bekerja ke bawah (W) ditentukan, maka gaya internal pada cangkang dapat diperoleh secara langsung. Karena gaya-gaya internal ini dinyatakan dalam gaya per satuan panjang, maka tegangan internal yang dinyatakan dalam gaya per satuan luas (misalnya $1b/in^2$ atau kN/mm^2) dapat diperoleh dengan membaginya dengan tebal cangkang. Jadi, $f_\phi = N\phi / tL$ di mana L mempunyai satuan panjang dan N_ϕ mempunyai satuan gaya per satuan panjang.



(a) Diagram umum gaya-gaya yang ada. Gaya cangkang dalam-bidang harus diterima oleh balok tepi. Pada elemen tepi timbul gaya aksial besar.

(b) Fondasi. Gaya aksial yang ada pada balok tepi menyebabkan dorongan ke luar di sepanjang diagonal. Oleh karena itu, harus digunakan penyokong atau batang tarik untuk mencegah gaya ke luar tersebut.

Gambar 12-6 Hiperbolik paraboloid. Perilaku umum gaya-gaya pada kebanyakan cangkang dapat dipelajari dengan meninjau jenis kelengkungan cangkang yang ada. Kelengkungan cekung umumnya menunjukkan jenis aksi seperti-kabel (yaitu tarik) sedangkan kelengkungan cembung menunjukkan aksi seperti-pelengkung (tekan).



(a) Gaya meridional yang bekerja pada bidang cangkang

(b) Jumlah komponen vertikal dari gaya meridional dalam-bidang yang timbul secara internal di dalam cangkang sama dengan beban mati dan hidup vertikal.

Gambar 12-7 Gaya meridional pada cangkang bola

Apabila beban per satuan luas yang bekerja ke bawah pada cangkang disebut w, maka keseimbangan dalam arah vertikal akan menghasilkan:

$$\sum F_r = 0:$$

$$-\int_{\phi_1}^{\phi_2} w(2\pi R \sin \phi) R \, d\phi + N_\phi \sin \phi (2\pi R \sin \phi) = 0$$

di mana ϕ_1 dan ϕ_2 mendefinisikan segmen cangkang yang ditinjau. Suku sebelah kiri adalah W. Untuk $\phi_1 = 0$, maka:

$$N_\phi = \frac{Rw}{1 + \cos \phi}$$

Ekspresi ini pada kenyataannya identik dengan $N_\phi = W/2\pi R \sin^2 \phi$. Kedua ekspresi tersebut menunjukkan gaya meridional yang ada pada potongan horizontal.

12.3.2 Gaya-gaya Melingkar

Gaya-gaya melingkar (hoop forces), yang biasa disebut N_θ dan dinyatakan sebagai gaya per satuan panjang, dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan dalam arah transversal. Alternatif lain, kita dapat menggunakan analisis membran yang telah dibahas pada Bab 11.2. Pada bab tersebut kita telah mendapatkan bahwa gaya-gaya dalam-bidang pada membran yang bekerja saling tegak lurus mempunyai hubungan $p_r = T_1/r_1 + T_2/r_2$. Ekspresi ini juga berguna pada cangkang karena dari ekspresi ini kita dapat memperoleh hubungan antara gaya melingkar (N_θ) dan gaya meridional (N_ϕ).

Karena beban yang kita tinjau ini berarah ke bawah, bukan radial ke luar, maka ekspresi gaya eksternal perlu disesuaikan. Komponen radial dari beban ke bawah dapat ditulis $p_r = w \cos \phi$. Jadi ekspresi yang menghubungkan gaya melingkar dan meridional adalah:

$$p_r = \frac{T_1}{r_1} + \frac{T_2}{r_2}$$

atau:

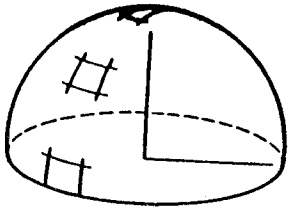
$$w \cos \phi = \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2}$$

atau:

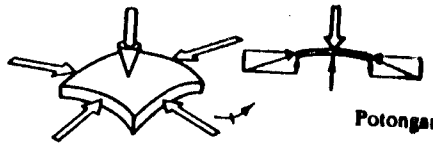
$$N_\theta = r_2 (w \cos \phi) - \left(\frac{r_2}{r_1}\right) N_\phi$$

untuk bola, $r_1 = r_2 = R$, dan menyubstitusikan ekspresi N_ϕ, maka kita peroleh:

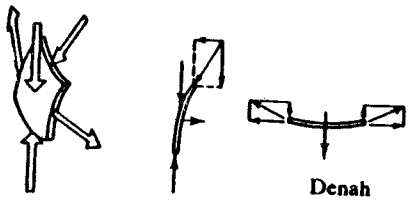
$$N_\theta = Rw\left(-\frac{1}{1 + \cos \phi} + \cos \phi\right)$$



(a) Struktur cangkang



(b) Diagram benda-bebas di puncak elemen cangkang. Semua gaya internal dalam-bidang harus berupa gaya tekan agar keseimbangan elemen dalam arah vertikal terpenuhi.



(c) Diagram benda-bebas elemen cangkang pada sudut $\phi = 90°$. Komponen ke luar dari gaya meridional harus diimbangi oleh gaya pada arah melingkar (yang harus berupa gaya tarik). Gaya melingkar ini bervariasi dari tekan di puncak cangkang ke tarik di bawah, bergantung pada geometri elemen tersebut dan beban yang bekerja.

Gambar 12-8 Gaya melingkar pada cangkang bola

Ini adalah ekspresi sederhana untuk gaya melingkar yang dinyatakan dalam jari-jari bola (R) dan beban ke bawah (w). Gambar 12-8 mengilustrasikan gaya melingkar pada cangkang.

CONTOH

Diberikan cangkang bola yang berjari-jari 100 ft (30,48 m), mempunyai tebal 4 in (100 mm), dan mempunyai sudut batas 45°. Tentukanlah gaya meridional dan gaya melingkar di dasar cangkang tersebut akibat beban 100 lb/ft^2 (4788 N/mm^2).

Solusi:

Gaya meridional:

$$N_\phi = \frac{Rw}{1 + \cos\phi}$$

$$= \frac{(100\text{ ft})(100\text{ lb/ft}^2)}{1 + 0{,}707}$$

$$= 5850\text{ lb/ft} \quad \text{(tekan)}$$

$$= \frac{(30{,}48\text{ m})(4788\text{ N/m}^2)}{1{,}707} = 85.494\text{ N/m}$$

Tegangan meridional:

$$f_\phi = \frac{N_\phi}{Lt} = \frac{5850\text{ lb/ft}}{(12\text{ in./ft})(4\text{ in.})}$$

$$= 122\text{ lb/in.}^2 \quad \text{(tekan)}$$

$$= \frac{85.494\text{ N/m}}{(1000\text{ mm/m})(100\text{ mm})} = 0{,}85\text{ N/mm}^2$$

Gaya melingkar:

$$N_\theta = Rw\left(-\frac{1}{1 + \cos\phi} + \cos\phi\right)$$

$$= (100\text{ ft})(100\text{ lb/ft}^2)\left[-\left(\frac{1}{1{,}707}\right) + 0{,}707\right]$$

$$= 1{,}212\text{ lb/ft} \quad \text{(tekan)}$$

$$= (30{,}48\text{ m})(4788\text{ N/m}^2)\left[-\left(\frac{1}{1{,}707}\right) + 0{,}707\right] = 17.684\text{ N/m}$$

Tegangan melingkar:

$$f_\theta = \frac{N_\theta}{Lt} = \frac{1.212\text{ lb/ft}}{(12\text{ in./ft})(4\text{ in.})}$$

$$= 25{,}3\text{ lb/in.}^2 \quad \text{(tekan)}$$

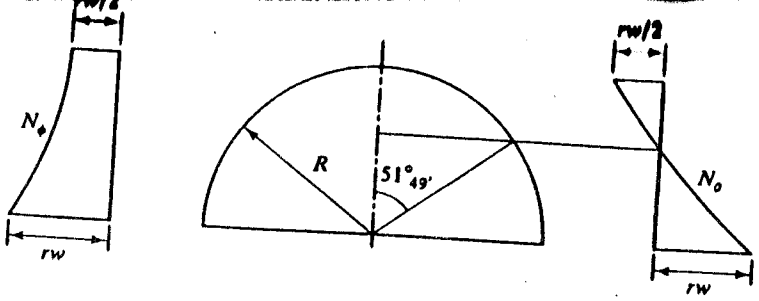
$$= \frac{17.684\text{ N/m}}{(1000\text{ mm/m})(100\text{ mm})} = 0{,}177\text{ N/mm}^2$$

Jadi, tegangan di titik ini pada cangkang bola, kecil. Ini merupakan karakteristik hampir semua struktur cangkang.

12.3.3 Distribusi Gaya

Distribusi gaya melingkar dan meridional dapat diperoleh dengan memplot persamaan kedua gaya tersebut (Gambar 12-9). Jelas terlihat bahwa gaya meridional selalu bersifat tekan, sementara gaya melingkar mengalami transisi pada sudut 51°49′ diukur dari garis vertikal. Potongan cangkang di atas batas ini selalu mengalami tekan, sedangkan di bawahnya dapat timbul tarik dalam arah melingkar. Tegangan-tegangan tersebut selalu relatif kecil.

Cara yang menarik dalam meninjau perilaku susunan kubah dan cincin terlihat pada Gambar 12-10. Sebagaimana yang terjadi pada struktur lain, momen eksternal pada setiap potongan harus dapat diimbangi oleh momen tahanan internal (dalam hal ini diberikan oleh kopel yang dibentuk antara gaya melingkar dan gaya cincin). Dengan cara demikian, kita dapat mempelajari distribusi tegangan melingkar tarik pada kubah.



(a) Gaya meridional (b) Gaya melingka

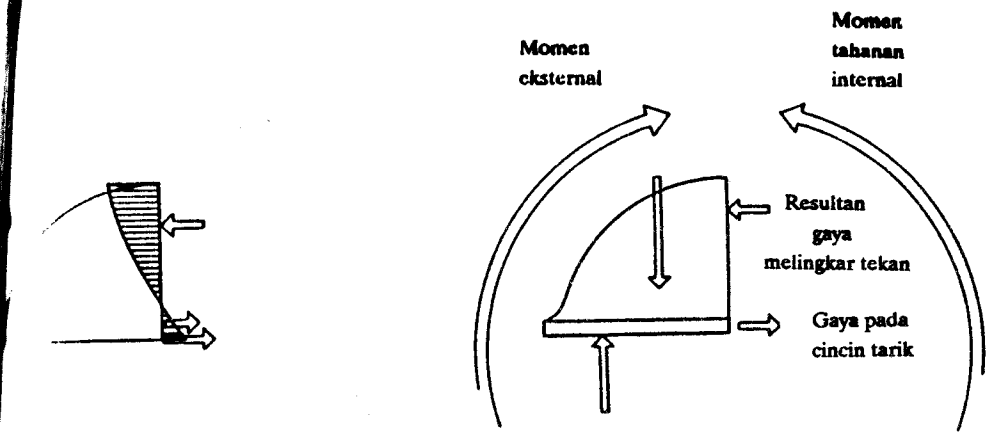
Gambar 12-9 Distribusi tegangan pada cangkang belahan bola yang mene beban terbagi rata di seluruh permukaan cangkang

12.3.4 Gaya Terpusat

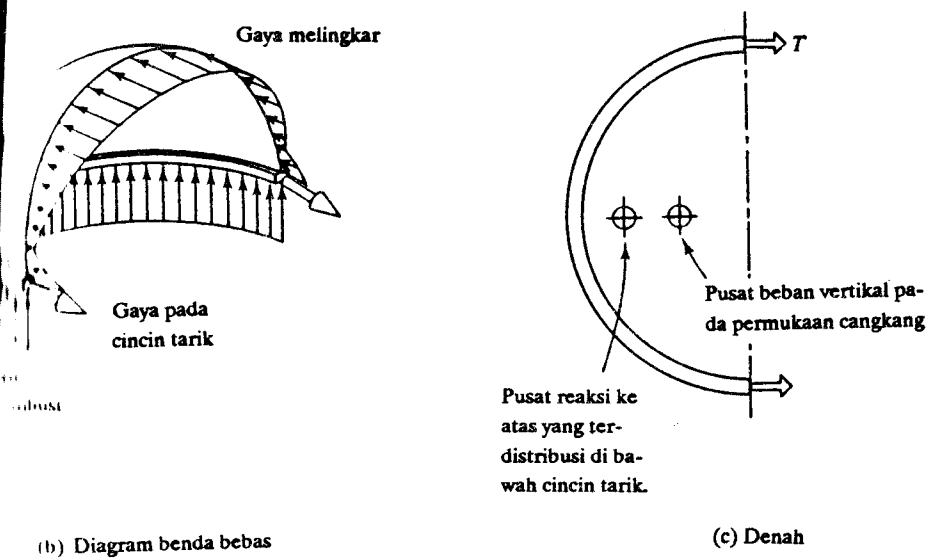
Alasan mengapa beban terpusat harus dihindari pada struktur cangkang dapat ter jelas dengan menganalisis gaya-gaya meridional yang ditimbulkan oleh beban sebut. Ekspresi umum yang telah kita peroleh sebelum ini adalah $N_\phi = W/$ $\sin^2 \phi$ di mana W adalah beban total berarah ke bawah. Untuk cangkang yang mikul beban terpusat P, ekspresi ini menjadi $N_\phi = P/2\pi R \sin^2 \phi$. Apabila be terpusat tersebut bekerja pada $\phi = 0$ (puncak cangkang), maka tegangan tepa bawah beban itu menjadi tak hingga (untuk $\phi \Rightarrow 0$, maka $\sin \phi \rightarrow 0$ dan $N_\phi \rightarrow$ Jelas hal ini dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan apabila permukaan cangk tidak dapat memberikan tahanan momen dan beban tersebut memang benar-be terpusat. Dalam segala hal, sebaiknya beban terpusat dihindari pada struk cangkang.

12.3.5 Kondisi Tumpuan

Seperti yang terjadi pada struktur-struktur lain, kondisi tumpuan kubah san mempengaruhi perilaku dan desain struktur. Secara ideal, tumpuannya tidak bo menimbulkan momen lentur pada permukaan cangkang. Jadi, kondisi jepit har dihindari. Salah satu solusi yang mungkin terlihat pada Gambar 12-11(b) di ma cangkang mempunyai tumpuan sendi di seluruh kelilingnya. Tidak seperti pa pelengkung, adanya gaya melingkar pada cangkang menyebabkan cangkang mengalami deformasi yang berarah ke luar bidang. Menahan deformasi ini deng menggunakan hubungan sendi sama saja dengan memberikan gaya pada to cangkang, yang berarti juga menimbulkan momen lentur. Karena itulah tumpu rol, seperti terlihat pada Gambar 12-11(c), lebih disukai. Sayangnya, tumpu demikian sulit dibuat pada struktur cangkang. Selain itu, perubahan sudut sedik saja pada tumpuan tersebut dapat menimbulkan momen lentur meskipun mungk masih lebih kecil daripada momen yang ditimbulkan dari penggunaan tumpu sendi atau tumpuan jepit.



(a) Potongan



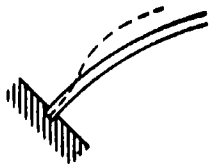
(b) Diagram benda bebas (c) Denah

Gambar 12-10 Perilaku cangkang dasar

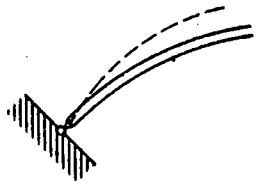
Berdasarkan tinjauan kemudahan konstruksi, momen lentur (yang tidak besar) biasanya boleh terjadi di tepi cangkang dengan maksud supaya kondisi fondasi dan tepi cangkang mudah dilaksanakan. Cangkang diperkaku secara lokal (biasanya dengan cara menambah ketebalannya) di sekitar tepi, dan khususnya diperkuat terhadap lentur.

Tinjauan utama pada desain fondasi adalah bagaimana menyerap gaya *tendangan* horizontal yang diasosiasikan dengan komponen berarah ke dalam dari gaya meridional dalam-bidang. Untuk itu dapat digunakan sistem *penyokong* (*buttresses*)

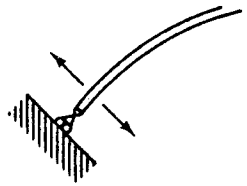
(a) Kondisi tepi bebas menimbulkan lentur yang tak diinginkan pada permukaan cangkang.



(b) Tepi sendi juga cenderung menahan permukaan cangkang dari gerakan.



(c) Tepi rol lebih diinginkan karena dapat terjadi gerakan bebas. Akan tetapi, tepi seperti ini sulit dilaksanakan.



Gambar 12-11 Kondisi tumpuan cangkang

seperti terlihat pada Gambar 12-12. Sistem demikian telah banyak digunakan pada gedung, khususnya pada kubah pasangan (bata) pada zaman dulu.

Cara lain untuk mengatasi gaya horizontal adalah dengan menggunakan cincin tarik. Cincin tarik ini berupa cincin planar yang menahan dorongan ke luar dari cangkang, jadi cincin ini mengalami tarik. Besar dorongan (tendangan) ke luar ini (per satuan panjang) adalah $N_\phi \cos \phi$. Gaya ini menyebabkan timbulnya gaya tarik pada cincin sebesar $T = (N_\phi \cos \phi)a$ di mana a adalah jari-jari cincin planar.

Cincin tarik harus dapat menyerap semua dorongan horizontal yang ada. Apabila terletak di atas tanah, harus ada fondasi menerus untuk meneruskan komponen gaya vertikal ke tanah. Alternatif lain, cincin dapat ditumpu pada elemen-elemen lain (misalnya kolom) yang hanya memikul gaya vertikal.

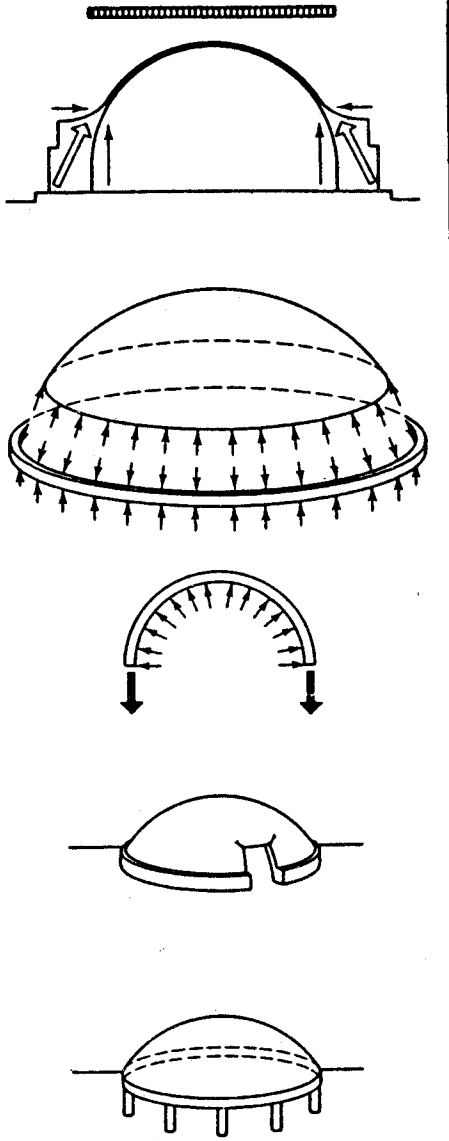
Penggunaan cincin tarik, bagaimana pun, menimbulkan juga momen lentur pada permukaan cangkang di mana terdapat pertemuan antara cangkang dan cincin. Momen lentur ini selalu diakibatkan oleh ketidakserasian deformasi yang terjadi di antara cincin dan cangkang. Deformasi melingkar pada cangkang dapat berupa tekan (jadi tepi cangkang berdeformasi ke arah dalam, bergantung pada kombinasi gaya N_ϕ dan N_θ). Sementara itu, deformasi balok cincin cenderung tidak sama dengan deformasi cangkang. Karena elemen-elemen tersebut harus digabungkan, maka cincin tepi membatasi gerakan bebas permukaan cangkang sehingga timbul momen di tepi cangkang. Seperti telah disebutkan di atas, momen ini *dimatikan* dengan cepat pada cangkang sehingga permukaan cangkang secara keseluruhan tidak

(a) Penyokong (*buttresses*). Komponen vertikal dan horizontal dari gaya meridional dapat dipikul oleh penyokong. Penyokong ini harus dapat menahan gaya dorong ke luar yang terjadi.

(b) Cincin tarik. Cincin tarik menerus dapat digunakan untuk menahan dorongan horizontal. Hanya gaya ke bawah yang disalurkan ke tanah.

(c) Apabila cincin tarik digunakan, cincin itu harus menerus di sekeliling cangkang. Apabila tidak demikian, maka cincin tersebut tidak bermanfaat dan akan ada tegangan berlebihan pada cangkang.

(d) Cangkang yang menggunakan cincin tarik dapat ditumpu oleh kolom-kolom karena di bawah cincin hanya ada gaya vertikal yang harus disalurkan ke tanah. Cangkang tanpa cincin tarik memerlukan sistem penyokong.

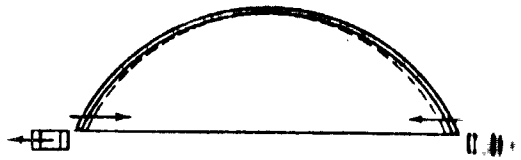


Gambar 12-12 Kondisi tumpuan cangkang bola

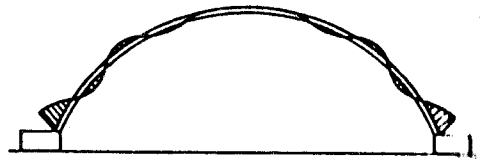
terpengaruh. Tetapi cangkang secara lokal diperkaku dan diperkuat terhadap lentur seperti terlihat pada Gambar 12-13.

Adanya masalah ketidakserasian deformasi mengharuskan kita mendesain dengan tujuan meminimumkan segala konsekuensi yang tak diinginkan. Salah satu metode yang efektif adalah yang menggunakan cara pascatarik dalam mengontrol

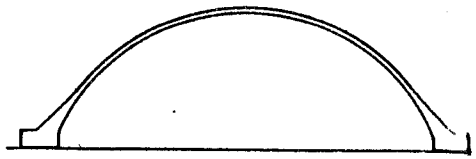
(a) Pada cangkang bola berprofil rendah, gaya membran dalam- bidang cenderung menyebabkan tepi cangkang bergerak ke dalam. Cincin yang menahan dorongan ke luar dari gaya meridional mengalami tarik, jadi cenderung bergerak ke luar.



(b) Adanya hubungan antara cincin dan tepi cangkang menyebabkan tertahannya masing-masing gerakan bebas. Ketidakserasian seperti ini menyebabkan timbulnya momen lentur di tepi cangkang, tetapi hal ini dengan cepat akan hilang pada cangkang.



(c) Tepi cangkang sering dipertebal pada pertemuan dengan cincin tarik untuk mencegah terjadinya tegangan lentur lokal yang besar.



Gambar 12-13 Gangguan tepi pada cangkang bola

deformasi. Balok cincin yang biasanya mengalami tarik, misalnya, dapat diberi gaya pascatarik sedemikian rupa sehingga gaya tekan dapat timbul dulu pada cincin (jadi deformasinya serasi dengan yang terjadi pada tepi cangkang). Gaya dorong ke luar dari cangkang kubah akan mengurangi gaya tekan (jadi memperbesar gaya tarik pada kabel pascatarik). Apabila besar gaya pascatarik awal dikontrol dengan baik maka deformasi cincin juga dapat terkontrol sehingga ketidakserasian dengan cangkang dapat diperkecil. Permukaan cangkang itu sendiri dapat juga diberi gaya pascatarik dalam arah melingkar untuk mengontrol deformasi dan gaya pada cangkang.

12.3.6 Tinjauan-tinjauan Lain

Banyak faktor yang harus ditinjau dalam desain cangkang selain yang telah dibahas di atas. Salah satu faktor kritis itu adalah keharusan menjamin bahwa cangkang tidak akan mengalami tekuk. Seperti telah disebutkan, masalah ini adalah masalah kestabilan. Apabila kelengkungan permukaan cangkang relatif datar, maka dapat terjadi tekuk *snap-through* atau tekuk lokal (lihat Gambar 12-14). Sebagaimana yang terjadi pada kolom panjang, ketidakstabilan dapat terjadi pada taraf tegangan rendah. Hal ini dapat dicegah dengan menggunakan permukaan yang berkelengkungan tajam. Keharusan menggunakan kelengkungan tajam ini tentu saja menyebabkan

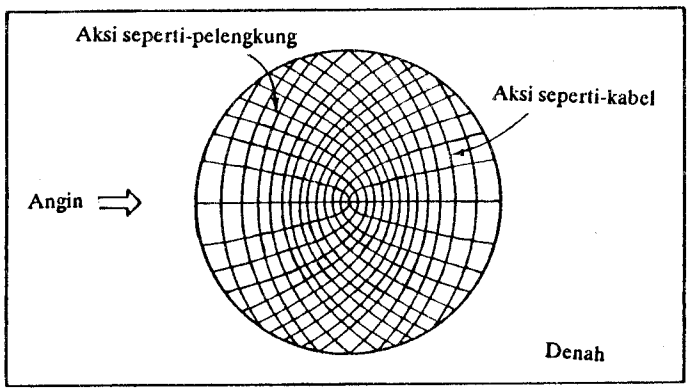
(a) Tekuk *snap-through* (jeblos). Seluruh cangkang menekuk ke dalam sebagai akibat beban eksternal. Cangkang yang mempunyai kelengkungan kecil bersifat peka terhadap tekuk seperti ini. Memperbesar kelengkungan cangkang akan memperkecil kemungkinan tekuk seperti ini.

(b) Tekuk lokal. Bagian lokal dari cangkang dapat mengalami tekuk ke arah dalam. Hal ini juga besar kemungkinan terjadi pada cangkang yang mempunyai kelengkungan kecil.

Gambar 12-14 Tekuk pada cangkang tipis

kita tidak dapat menggunakan cangkang berprofil rendah dan berbentang besar (cangkang dengan kelengkungan kecil). Masalah ini juga terjadi pada cangkang yang terbuat dari elemen-elemen linear kaku (misalnya kubah geodesik). Pembaca dapat mempelajari literatur lain yang membahas masalah tekuk cangkang dan menerapkannya dalam desain.

Masalah lain yang juga penting diperhatikan adalah cangkang harus mampu juga menahan beban-beban yang berarah tidak vertikal. Gambar 12-15 mengilustrasikan trajektori tegangan pada kubah bola akibat beban angin. Biasanya beban angin bukan merupakan masalah kritis dalam desain struktur cangkang. Beban gempa, yang juga berarah lateral seperti beban angin, dapat menimbulkan masalah serius dalam desain. Apabila ada beban tersebut, kita harus berhati-hati dalam mendesain kondisi tumpuan cangkang.



Gambar 12-15 Trajektori tegangan pada kubah belahan bola akibat beban angin

SOAL

12–1. Suatu cangkang bola kaku yang mempunyai jari-jari 300 ft dipotong pada sudut $\phi = 51^{\circ}49'$. Anggap bahwa cangkang ini memikul beban hidup terbagi rata sebesar 50 lb/ft^2. Berapakah gaya dalam-bidang pada cangkang untuk sudut $\phi = 0^{\circ}$ dan $\phi = 51^{\circ}49'$? Berapa pula tegangan f_ϕ dan f_θ di potongan yang sama? Abaikan berat sendiri cangkang.

12–2. Cangkang beton bertulang kaku yang mempunyai jari-jari bola 200 ft dipotong pada sudut $\phi = 35^{\circ}$. Tebal cangkang adalah 3 in. Anggap bahwa berat satuan material cangkang adalah 150 lb/ft^3 dan cangkang memikul beban hidup 60 lb/ft^2. Gambarlah distribusi gaya seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 12-9. Tunjukkan nilai-nilai numeriknya. Berapakah tegangan tekan maksimum f_ϕ yang timbul pada permukaan cangkang? Berapa pula tegangan tarik maksimum f_θ?

12–3. Anggap bahwa suatu balok cincin tarik digunakan bersama cangkang pada Soal 12–1. Berapakah besar gaya yang timbul pada cincin tersebut?

Bagian III

PRINSIP-PRINSIP DESAIN STRUKTURAL

Pada Bagian III ini dibahas prinsip-prinsip penting dalam desain struktur dalam konteks gedung. Proses desain struktural ini selalu berkaitan dengan desain bagian-bagian lain pada gedung yang bersangkutan. Di sini juga dibahas masalah desain struktural yang timbul pada berbagai tahap pengembangan desain gedung.

Bab 13 membahas tinjauan desain yang muncul pada taraf paling awal dalam desain gedung di mana perencana masih mengembangkan ruang-ruang fungsional pada gedung dan mempelajari masing-masing karakter dasarnya. Setelah tahap ini adalah tahap pengembangan desain di mana mulai digunakan cara-cara dasar untuk situasi yang sedang dihadapi. Bab 14, 15, dan 16 membahas secara rinci masalah yang terjadi pada taraf desain struktural. Dalam meninjau desain-desain elemen struktur aktual, kita perlu mengulang kembali Bagian II (misalnya menentukan ukuran balok untuk suatu kondisi bentang dan beban tertentu).

Proses biasa dalam desain, perlu diingat, pada kenyataannya lebih rumit daripada urutan pembahasan pada Bagian III ini. Biasanya proses itu berlangsung iteratif dan melibatkan banyak pilihan struktural. Selama proses ini, persyaratan struktural untuk suatu cara desain dapat menentukan karakteristik gedung, begitu pula sebaliknya. Cara desain iteratif wajar dilakukan.

Sistem struktural yang akhirnya digunakan biasanya adalah yang dapat berfungsi baik sesuai dengan namanya ("sistem struktural"), juga memenuhi persyaratan arsitektural.

Banyak pilihan desain yang disajikan pada Bagian III ini, disertai keuntungan dan kerugian masing-masing. Pembaca dianjurkan untuk mempelajarinya disertai polemik (keuntungan dan kerugian) yang ada karena, dengan cara demikian, pembaca terbiasa menghadapi situasi desain yang aktual di mana sering timbul hal-hal yang saling bertentangan, yang harus dipilih.

Bab 13

POLA DAN GRID STRUKTURAL

13.1 PENDAHULUAN

Studi mengenai gedung yang telah ada memperlihatkan fakta yang cukup jelas bahwa pada umumnya ada hubungan yang erat antara susunan fungsional gedung dan sistem struktural yang digunakan. Pola yang dibentuk oleh konfigurasi struktural mempunyai hubungan erat dengan pola yang dibentuk berdasarkan pengaturan fungsional. Masing-masing pola ini saling mempengaruhi. Pemakaian konfigurasi fungsional tertentu untuk suatu gedung sering kali menentukan desain struktur yang akan digunakan, begitu pula sebaliknya. Karena alasan inilah proses mendesain suatu struktur secara implisit berkaitan juga dengan proses mendesain gedung secara keseluruhan. Salah satu proses itu tidak akan ada tanpa adanya proses lainnya.

Pada tahap sangat awal dari suatu desain, pola apa yang akan ada pada suatu gedung masih belum diketahui. Salah satu cara dalam menginterpretasikan aktivitas desain selama tahap awal ini adalah bahwa perencana memanipulasikan fungsi-fungsi gedung secara terprogram dengan maksud memperoleh informasi: apabila suatu bahan gedung digunakan, apakah hasilnya sesuai dengan tujuan desain atau tidak. Selama proses ini, perencana sering kali menggunakan organisasi pola pada gedung dan menjumpai alasan-alasan yang dapat menghasilkan suatu pola umum, baik mengenai penggunaan ruang maupun mengenai penggunaan strukturnya. Perilaku *cellular* pada rumah *multiunit* merupakan contoh mengenai hal ini. Persyaratan *privacy* untuk masing-masing unit secara alami akan mengharuskan penggunaan pola berulang dari modul-modul ruang yang sesuai dengan ukuran setiap unit. Pada gedung khas, hal-hal yang mengharuskan penggunaan suatu pola sering kali merupakan akibat dari persyaratan fungsional gedungnya atau tinjauan konstruksi karena persyaratan struktural. Kenyataan bahwa ada keuntungan dalam menggunakan suatu pola tertentu, bagaimana pun, merupakan faktor yang juga menentukan, khususnya pada situasi bentang besar atau beban besar.

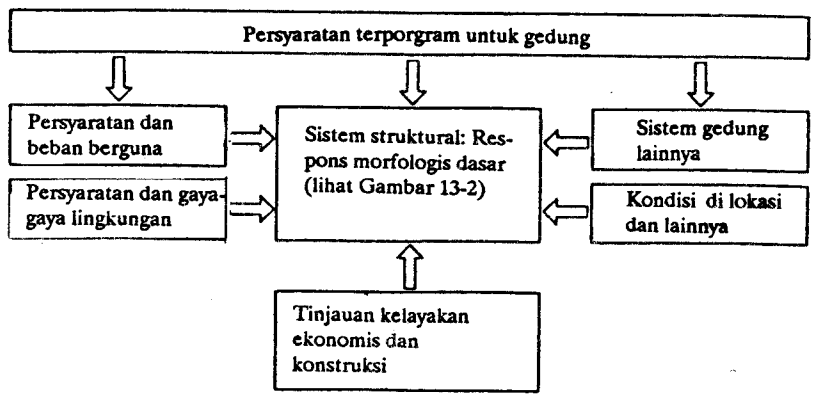
Berikut ini kita akan membahas secara ringkas berbagai aspek mengenai struktur gedung. Akan tetapi, sebelum lebih jauh membahas pola struktural secara lebih rinci, kita akan membahas hal mendasar terlebih dulu. Hal yang dimaksud adalah bahwa pola sangat bervariasi dari yang abstrak hingga menuju keseragaman. Pola itu membentuk struktur, tetapi tidak selalu demikian. Suatu struktur merupakan konsepsi abstraksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pola. Konsep mengenai struktur selalu melibatkan hubungan antara elemen-elemen pembentuknya. Secara konsep, pola lebih terbatas. Bab 13 ini hanya akan memusatkan pembahasan pada tinjauan terbatas mengenai struktur.

13.2 POLA AGREGASI UNIT DASAR

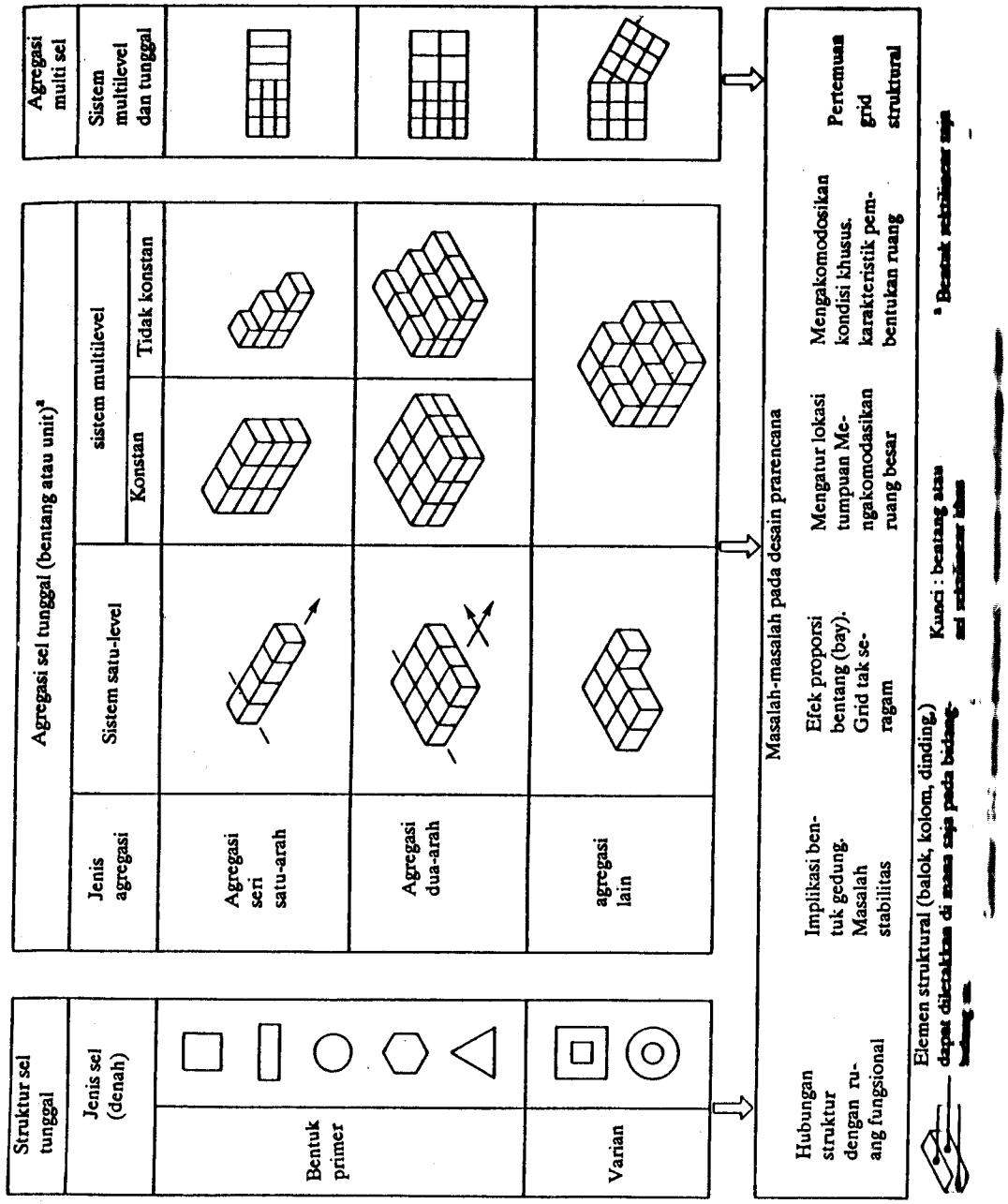
Banyak jenis pola struktural yang mungkin ada. Pada banyak gedung biasanya ada grid atau pola geometris yang berulang, baik pada sistem tumpuan vertikalnya (yang dibentuk oleh dinding pemikul beban, kolom, atau kombinasi dari keduaduanya) maupun pada sistem yang membentang secara horizontal. Pola-pola juga umumnya ada pada elemen-elemen pada elevasi yang berbeda.

Berikut ini akan dibahas jenis gedung yang terdiri atas bentang-bentang yang berulang atau unit berbentuk *cellular*. Geometri dan dimensi masing-masing unit dan bagaimana masing-masing unit ini tersusun pada suatu gedung selalu tergantung pada persyaratan terprogram gedung tersebut (Gambar 13-1). Dimensi dan geometri ini pada gilirannya mempengaruhi sistem struktural yang paling cocok untuk digunakan.

Untuk memperoleh dasar diskusi selanjutnya mengenai implikasi struktural berbagai pola, kita perlu mengulang secara ringkas beberapa karakteristik dasar jenis pola yang ada. Gambar 13-2 mengilustrasikan, secara sederhana, bagaimana konfigurasi gedung dapat dicirikan dengan pola agregasi dasarnya. Memang jelas bahwa banyak gedung (misalnya *gymnasium*) yang secara aktual merupakan struktur bersel tunggal. Akan tetapi, banyak pula gedung yang merupakan gabungan antara



Gambar 13-1 Faktor-faktor dasar yang mempengaruhi desain struktur



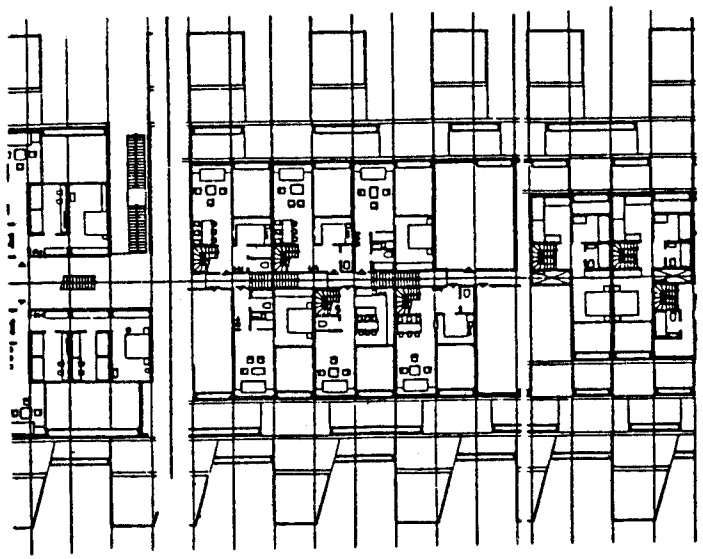
sejumlah unit atau *bentang*. Mengonsepkan suatu gedung dengan pola agregasinya tentu saja hanya merupakan cara untuk mencirikan konfigurasinya. Sekalipun demikian, hal ini sangat berguna menurut tinjauan struktural.

Sudah terbukti bahwa banyak konfigurasi yang mungkin digunakan. Tentu saja kita dapat mengharapkan bahwa setiap respons strukturl hanya cocok untuk konfigurasi tertentu. Kita dapat menyebutkan contoh-contoh yang merupakan agregasi (penggabungan) linear sederhana. Pada gedung bertingkat banyak (jadi, gedung yang agregasinya secara vertikal), beban lateral merupakan faktor dominan, sementara pada gedung yang agregasinya secara horizontal, beban yang mungkin dominan adalah beban vertikal. Sebagai akibatnya, respons struktural yang berbeda hanya akan cocok untuk masing-masing kasus tersebut (lihat Bab 14). Meskipun hanya terhadap pola pada bidang horizontal, kita dapat melihat bahwa respons tertentu hanya akan cocok untuk agregasi satu arah secara seri, sementara respons lainnya hanya cocok untuk agregasi dua arah secara seri (lihat Bab 13.7).

Berikut ini kita bahas contoh-contoh untuk memperjelas maksud grid atau pola struktural pada gedung. Pada bagian akhir bab ini dibahas masalah desain yang berkaitan dengan hal ini.

13.3 POLA STRUKTURAL UMUM

Beberapa jenis pola struktural pada gedung diperlihatkan pada Gambar 13-3, 13-4, 13-5, dan 13-6. Gambar pertama memperlihatkan skema gedung yang menggunakan pola agregasi dalam pembentukan unit dasarnya. Pola struktural itu terutama terdiri atas sederetan garis paralel. Garis-garis paralel dapat terdiri atas sederetan dinding pemikul beban atau sistem balok-dan-kolom yang diletakkan pada lokasi pola yang

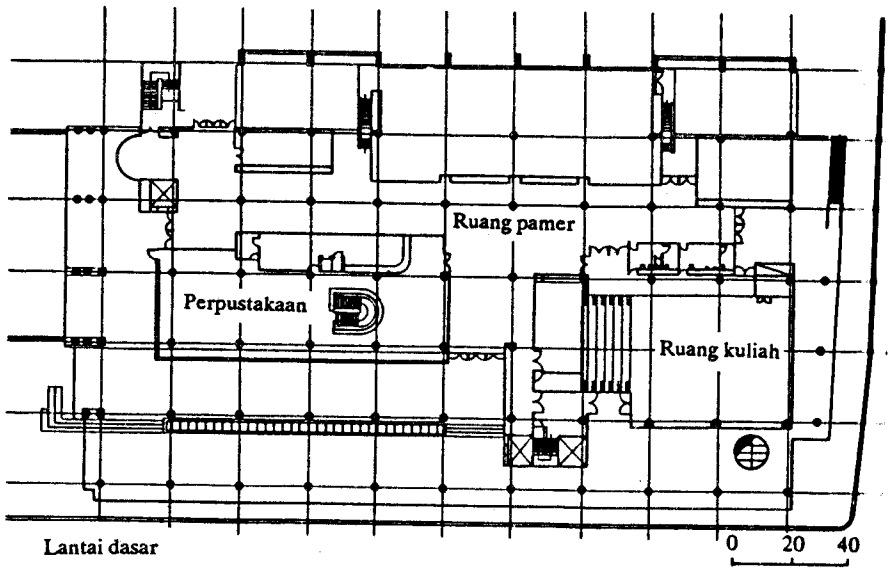


Gambar 13-3 Rumah di Jerman

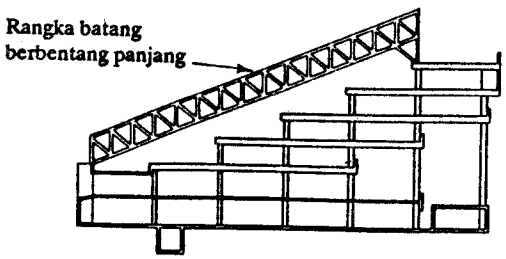
sama (sistem yang membentang secara horizontal dapat digunakan untuk berba jenis sistem vertikal). Hal ini merupakan pola grid dasar yang sangat penting. Pemi lihan salah satu jenis sistem penumpu vertikal di antara berbagai jenis yang ada sering kali, atau dapat saja, merupakan hal sekunder untuk jenis gedung demikian.

Grid bujursangkar sebagai elemen penumpu vertikal diskret diperlihatkan pada denah dalam Gambar 13-4. Pada gambar ini digunakan agregasi dua arah. Dalam denah ini polanya seragam di seluruh gedung kecuali di tepi kiri gedung dan di daerah auditorium. Grid sering berubah pada daerah di mana ada hal khusus terjadi seperti auditorium atau di batas-batas. Penjelasan mengenai hal ini diuraikan pada bagian lain Bab 13.

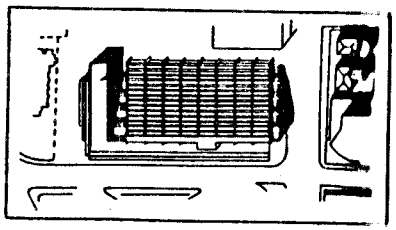
Grid elemen penumpu vertikal diskret yang lebih kompleks terlihat pada Gambar 13-5. Gedung ini adalah salah satu contoh yang memperlihatkan bagaimana suatu gedung dapat mempunyai kaitan dengan (mempengaruhi) pembagian ruang fungsional. Pada gedung demikian, geometri dasarnya juga akan berganti apabila kondisi khusus, pada contoh ini *gymnasium*, terjadi.



(a) Grid kolom bujursangkar

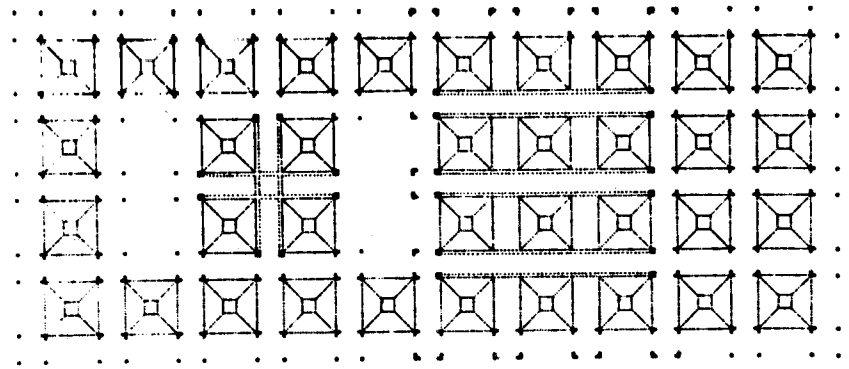


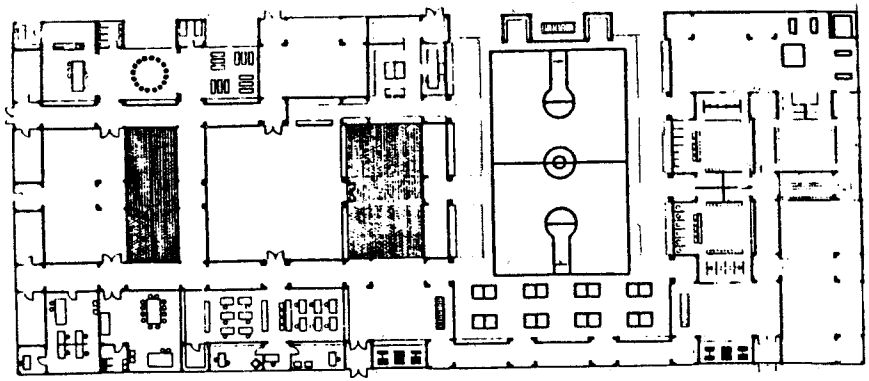
(b) Potongan



(c) Denah

Gambar 13-4 Gund Hall, Harvard University, Cambridge, Mass.

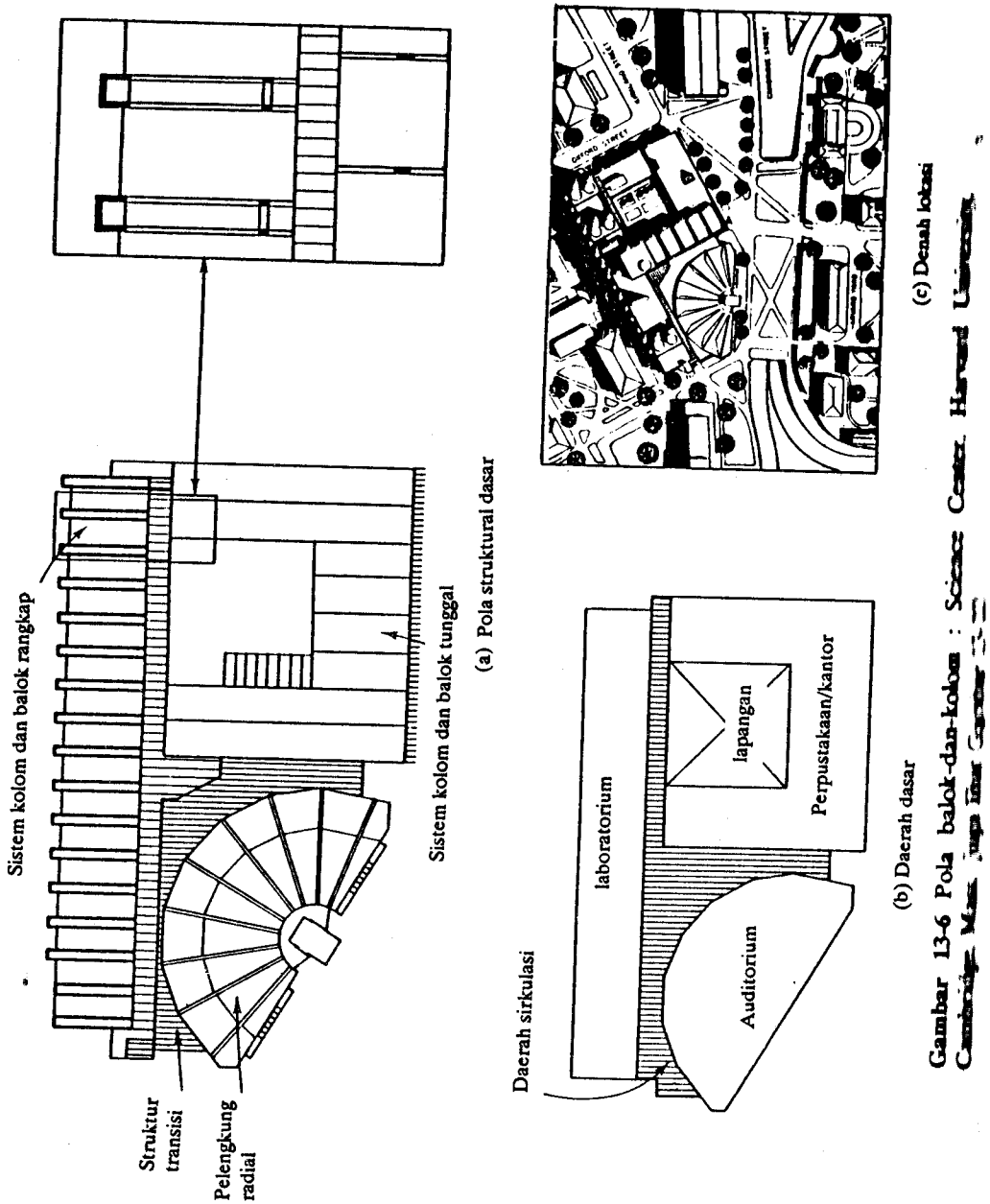




Gambar 13-5 Trenton Community Center, Trenton, N.J.

Geometri lainnya, misalnya heksagonal atau segitiga, juga dapat dipakai sebagai pola struktural. Bagaimana pun, perlu diingat bahwa pada umumnya, apabila gaya-gaya yang secara normal menghasilkan pola pada gedung ditinjau kaitannya dengan masalah konstruksional dan struktural, pola dengan segiempat adalah yang paling berguna dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Konfigurasi demikian memang paling banyak digunakan.

Gambar 13-6 mengilustrasikan gedung banyak-sel yang terdiri atas bukan hanya satu, melainkan *beberapa* jenis pola struktural. Di bagian belakang gedung ini digunakan sistem balok-dan-kolom, sementara di bagian depannya digunakan satu sistem balok-dan-kolom yang lebih tradisional. Sistem ketiga, yang terdiri atas pelengkung-pelengkung radial, digunakan pada kompleks auditorium. Antara pola struktural utama tersebut ada struktur transisi. Alasan utama penggunaan banyak pola itu terutama adalah adanya banyak zone fungsional yang berbeda pada gedung tersebut. Pada bagian lain bab ini akan dijelaskan hal-hal yang lebih rinci mengenai hal ini. Sejauh ini, yang perlu kita catat ialah bahwa gedung seperti ini menimbulkan pertanyaan desain struktural yang amat penting, yaitu mana yang lebih dikehendaki di antara penggunaan satu pola umum di mana semua kegiatan fungsional pada



(a) Pola struktural dasar

(b) Daerah dasar

(c) Denah lokasi

Gambar 13-6 Pola balok-dan-kolom : Science Center, Harvard University, Cambridge, Mass. juga lihat Gambar 13-7

gedung harus disesuaikan dengan pola tersebut (yang tentu saja ada perubahan bentuk minor), dan penggunaan banyak sistem struktural sebagai respons terhadap setiap kondisi khusus yang ada. Gambar 13-4 dan 13-5 memperlihatkan ilustrasi cara yang pertama, sementara Gambar 13-6 mengilustrasikan cara kedua. Skala gedung dan perubahan jenis ruang tentu saja merupakan tinjauan yang penting di samping tinjauan konstruksional dan struktural.

13.4 MANIPULASI POLA

Salah satu aktivitas yang secara normal diambil oleh perencana dalam proses pengembangan sistem struktural yang cocok untuk suatu gedung adalah mencoba mencari kecocokan berbagai jenis pola struktural umum dengan gedung yang akan dibangun. Untuk memperjelas prosesnya, juga mengilustrasikan beberapa kesulitan yang mungkin ada, kita pelajari sebuah gedung fiktif. Maksudnya adalah untuk memantapkan topik-topik yang telah dibahas pada bab ini.

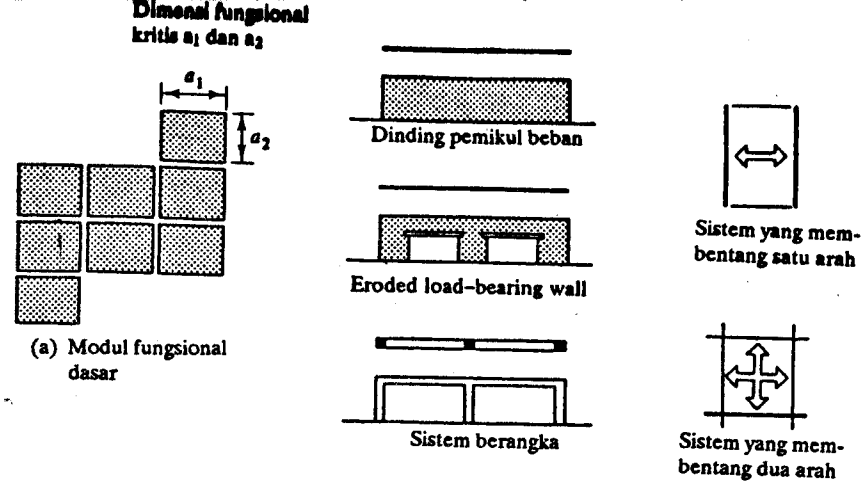
Tinjaulah denah gedung fiktif yang ada pada Gambar 13-7(a), yang secara sembarang diasumsikan terdiri atas sederetan ruang modul yang mempunyai susunan dan dimensi *masing-masing sesuai dengan persyaratan yang te*rprogram pada gedung tersebut. Anggap bahwa dimensi modular kritis kita sebut a_1 dan a_2. Panjang a_1 atau a_2 dianggap sebagai dimensi bentang bersih minimum yang mungkin berdasarkan syarat fungsional. Dengan demikian, tumpuan vertikal tidak dapat diletakkan lebih dekat daripada dimensi tersebut. Sekalipun demikian, lokasi ini dapat sedikit lebih jauh karena a_1 dan a_2 adalah bentang minimum, dan bukan bentang maksimum.

Untuk banyak jenis gedung, umum untuk memulai proses desain dengan meletakkan elemen-elemen yang dimaksudkan untuk memikul elemen struktur horizontal. Pada tahap desain awal, biasa untuk meninjau pola hanya berdasarkan tumpuan garis dan titik. Yang dimaksud dengan *tumpuan titik* tentu saja kolom. Sedangkan konsep mengenai *tumpuan garis* dapat secara berguna diperluas dari dinding pemikul beban sampai susunan *post*-dan-balok atau rangka di mana panjang menerus balok-balok membentuk tumpuan garis. Jelas bahwa tumpuan garis itu juga menunjukkan setiap jenis sistem dinding [lihat Gambar 13-7(b)].

Sudah jelas bahwa sistem yang membentang secara horizontal dua arah atau satu arah yang terdiri atas elemen-elemen yang membentang secara horizontal (misalnya balok, rangka batang, pelat) dapat digunakan bersama pola penumpu yang berbeda-beda seperti terlihat pada gambar tersebut.

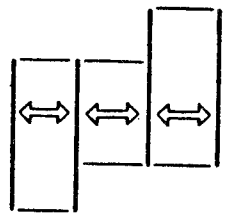
Untuk gedung pada gambar itu jelas bahwa apabila tidak ada cara desain lain selain pembentukan secara acak yang digunakan, sangat banyak jenis pola struktural yang dapat dibentuk dengan menggunakan kombinasi sistem yang membentang secara vertikal dan horizontal. Memang, tidak semua kombinasi dapat digunakan, tetapi juga tidak ada dasar pemilihan yang pasti. Salah satu dari solusi yang terlihat pada Gambar 13-7(c)-(h), misalnya, dapat saja digunakan. Jadi, cara-cara desain ini dapat menghasilkan pola gedung yang sangat berbeda.

Jelas bahwa pembentukan pola tanpa menggunakan kriteria pemilihan yang benar, kurang berguna. Sayangnya, kriteria eksak untuk pemilihan struktural jarang ada, tetapi hal ini dapat dikembangkan bersamaan dengan proses desain gedungnya.

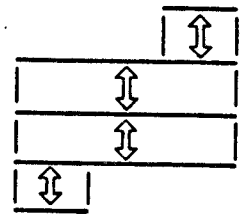


(a) Modul fungsional dasar

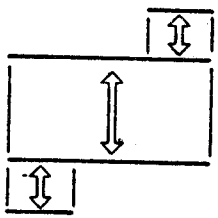
(b) Sistem tumpuan horizontal dan vertikal



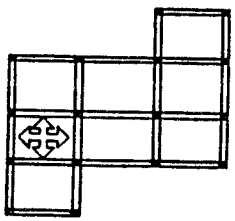
(c) Sistem satu arah



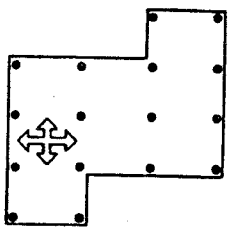
(d) Sistem satu arah



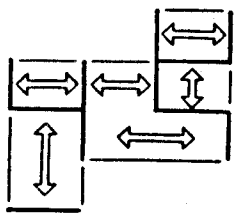
(e) Sistem satu arah



(f) Sistem dua arah



(g) Sistem plat datar dua arah



(h) Sistem satu arah

Gambar 13-7 Pola tumpuan vertikal. Banyak gedung yang cocok menggunakan berbagai jenis pola struktural menurut berbagai pendekatan struktural.

Pada tahap ini, dasar pemilihannya haruslah yang dapat memberikan keuntungan terbesar di antara semua alternatif solusi. Membingungkan, misalnya, apabila ada suatu solusi yang lebih tidak teratur, ternyata pada jangka panjang dapat memberikan keuntungan. Contoh lain, solusi yang terlihat pada Gambar 13-7(h) mungkin saja dapat dibuktikan sebagai solusi yang sulit dilaksanakan sehingga mungkin membutuhkan paling banyak biaya dibandingkan dengan solusi lainnya (meskipun hal ini juga bergantung pada skala gedungnya). Pola sederhana biasanya lebih efisien digunakan daripada pola kompleks. Dengan demikian, menarik untuk mengingat bahwa biasanya, apabila suatu gedung dapat dibentuk dengan banyak cara di mana tidak ada satu solusi pun yang lebih baik daripada yang lainnya, gedung tersebut sangat mungkin tidak akan menimbulkan masalah (berdasarkan tinjauan struktural) pada tahap desain, bagaimana pun pilihan yang diambil.

Sekalipun kriteria eksak untuk pemilihan sistem sering kali sulit diperoleh pada tahap desain awal, kita dapat melakukan identifikasi beberapa di antara hal-hal dasar yang ada untuk mulai mengembangkan cara-cara pengembangan pola struktural yang paling diinginkan, dan mempunyai potensial untuk menghasilkan sistem struktural yang efisien dan dapat dipertahankan.

Apakah, misalnya suatu cara desain yang selalu memiliki hubungan satu-kepada-satu cocok untuk digunakan di antara sistem ini meminimumkan bentang bersih, dengan kerugian banyak menggunakan elemen vertikal) lebih baik atau lebih buruk dibandingkan dengan cara desain yang mempunyai bentang horizontal lebih besar dan menggunakan sedikit elemen vertikal.

Masalah kritis lainnya adalah bahwa analisis dan pengalaman menunjukkan bahwa setiap pola tumpuan vertikal mempunyai banyak jenis sistem yang membentang horizontal. Pengetahuan mengenai hal ini sangat berguna dalam menentukan sistem yang membentang vertikal dan horizontal.

Masalah lain yang juga ada ialah apakah gaya yang unik, yang diasosiasikan dengan gempa, akan menyebabkan beberapa jenis pola lebih baik daripada yang lainnya. Masalah ini, juga masalah lain yang penting dalam menentukan sistem struktural yang layak pada saat proses desain awal, akan dibahas berikut ini.

13.5 MASALAH STABILITAS

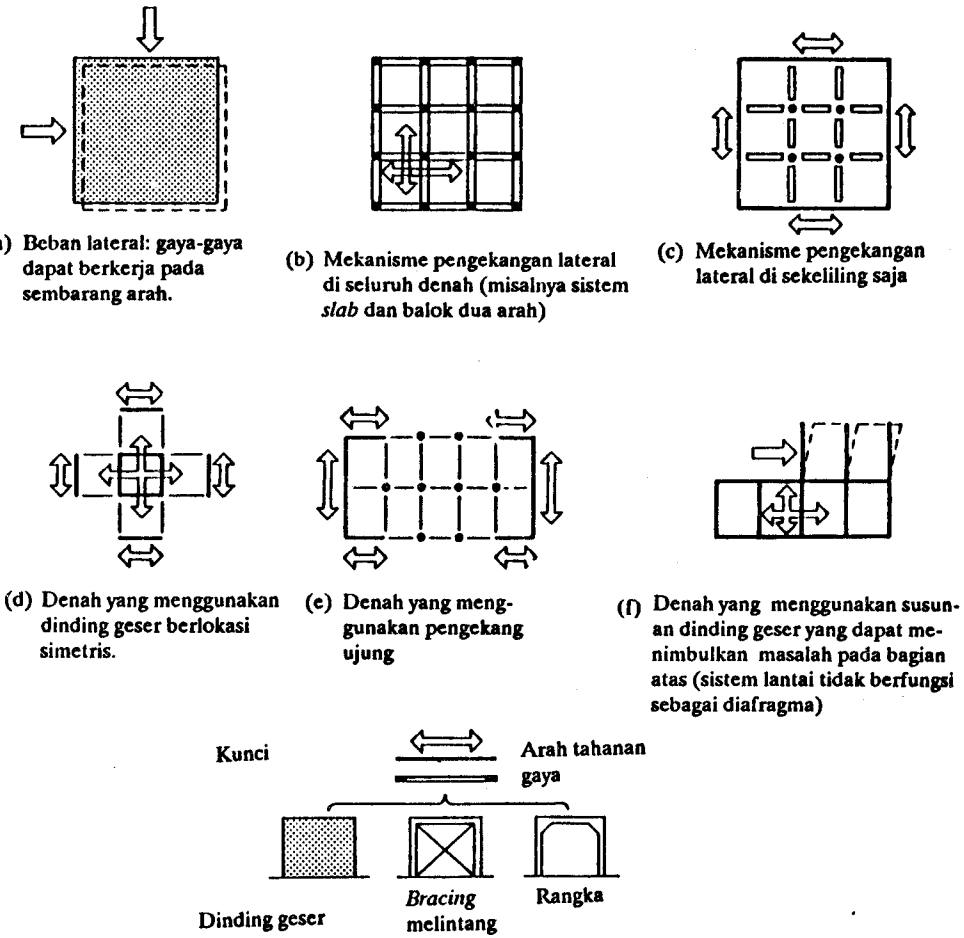
Meskipun masalah ini akan dibahas lebih mendalam pada Bab 14, di sini perlu diingat bahwa jenis beban sesungguhnya yang ada pada struktur sangat mempengaruhi pemilihan pola struktural yang cocok.

Yang merupakan masalah dasar di sini adalah bahwa struktur harus terorganisasi sedemikian rupa sehingga mempunyai mekanisme pemikul beban lateral yang cukup. Beberapa sistem, misalnya konstruksi rangka balok-dan-*slab* dari beton bertulang, umumnya mempunyai mekanisme tersebut. Sementara itu, pada sistem lain, seperti *joist* yang digunakan bersama dinding bata pemikul beban, tidak memiliki mekanisme itu sehingga tidak stabil untuk memikul beban lateral.

Pada grid segiempat yang umum digunakan, syarat kestabilan biasanya berarti bahwa rangka, dinding geser, atau *bracing* diagonal diletakkan pada sederetan bidang yang saling tegak lurus di seluruh bagian gedung. Implikasi pola demikian tentu

saja ada. Pola seperti terlihat pada Gambar 13-8(f) tentu saja menimbulkan masalah untuk kondisi beban yang bekerja tegak lurus terhadap bidang dinding geser. Yang terlihat pada Gambar 13-8(b)—(e) tentu lebih layak digunakan.

Pada tahap sangat awal dalam desain, kita cukup mengidentifikasi cara penahan laeral dasar dan implikasinya terhadap pola. Hal ini tidak selalu berarti harus menggunakan salah satu di antara aksi rangka, dinding geser, atau *bracing* diagonal untuk memikul beban lateral. Lokasi bidang yang layak untuk elemen-elemen tersebut, bagaimana pun, harus ditentukan. Bab 14 membahas hal ini secara lebih rinci.



Gambar 13-8 Kestabilan lateral sembarang struktur yang mengalami sembarang kondisi pembebanan harus dicapai dengan menggunakan mekanisme pemikul beban lateral.

13.6 HUBUNGAN ANTARA STRUKTUR DENGAN RUANG FUNGSIONAL

Jenis, pola, dan skala sistem tumpuan vertikal yang ada pada suatu gedung sangat mempengaruhi jenis sistem yang membentang secara horizontal, begitu pula sebaliknya. Geometri tumpuan, pada gilirannya, mempengaruhi dimensi kritis yang didapat dari tinjauan penggunaan fungsional gedung.

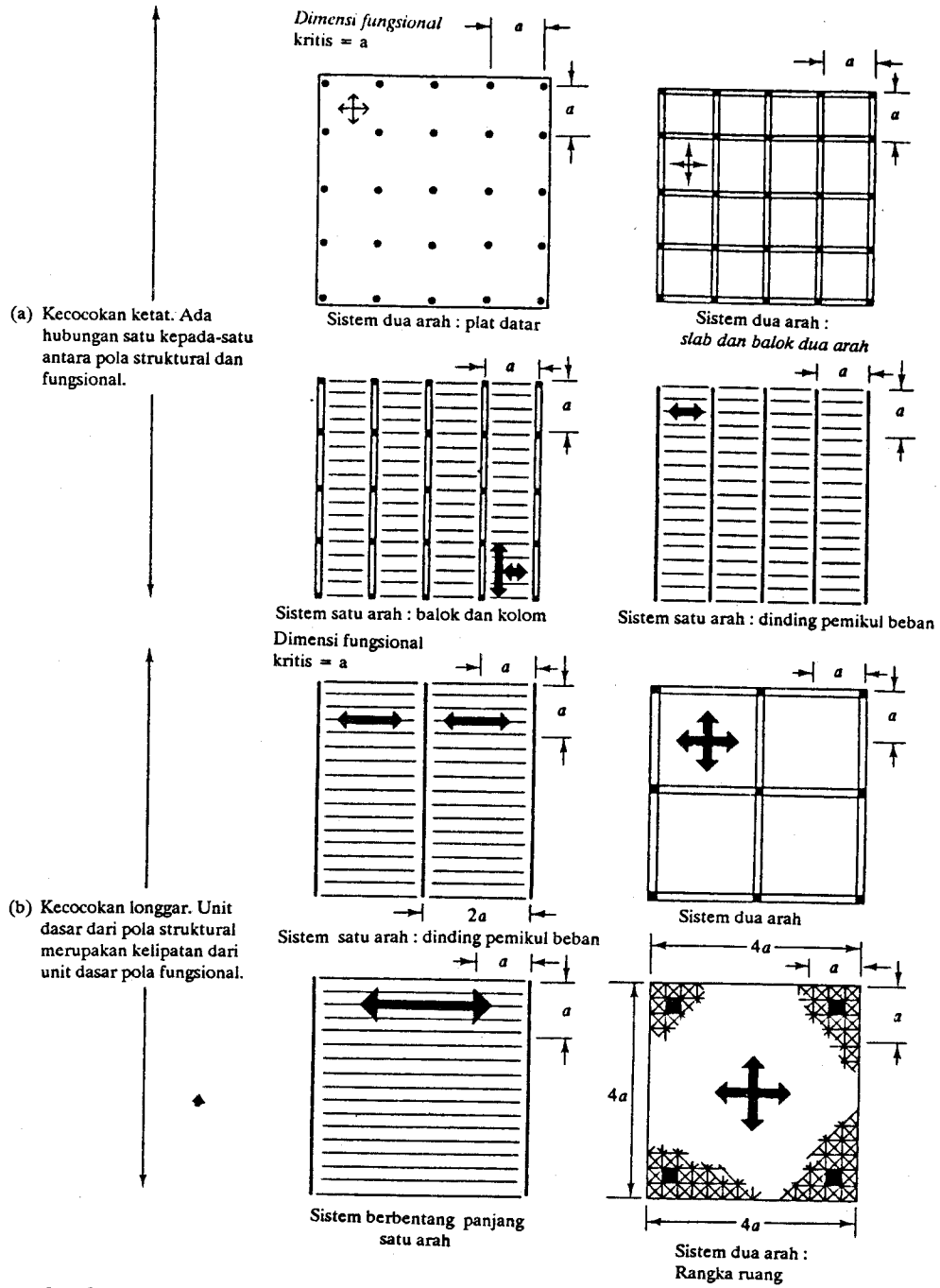
Perhatikan gedung fiktif sederhana yang terlihat pada Gambar 13-9 di mana dimensi modular kritis yang berkaitan dengan fungsi gedung itu adalah a dan merupakan dimensi bentang bersih minimum. Dimensi modular kritis ini dapat kecil menurut dimensi absolutnya, seperti pada rumah, atau besar, seperti pada fasilitas olah raga.

Jelas bahwa untuk gedung yang dapat dicirikan dengan cara demikian, banyak pendekatan struktural yang mungkin, bergantung pada bagaimana struktur tersebut berhubungan dengan grid fungsional. Gambar 13-9 mengilustrasikan beberapa yang mungkin. Tujuan desain struktural yang utama adalah menentukan derajat kecocokan yang mungkin (atau yang lebih dikehendaki) di antara pola yang ditentukan oleh tumpuan vertikal dan yang ditentukan oleh dimensi fungsional kritis a. Pemilihan derajat kecocokan menentukan besar bentang horizontal pada sistem struktural tersebut dan, dengan demikian, menentukan sistem penumpu yang dipakai. Gambar 13-9(a) mengilustrasikan beberapa kecocokan satu-kepada-satu di mana unit struktural utama yang digunakan secara berulang berkaitan langsung dengan a. Gambar lainnya memperlihatkan kecocokan paling longgar di mana unit struktural merupakan kelipatan dari a. Apabila a adalah bentang bersih minimum yang mungkin berdasarkan alasan fungsional, maka baik kecocokan satu-kepada-satu maupun kecocokan longgar dapat digunakan. Tentu saja persyaratan fungsional lainnya (misalnya sirkulasi) juga dapat menentukan hal ini.

Bagaimanapun, dengan hanya meninjau derajat kecocokan, jelas bahwa apabila kecocokan yang mungkin adalah satu-kepada-satu dan a bukanlah dimensi yang sangat kecil, maka penggunaan kecocokan longgar tidak tepat dilakukan berdasarkan tinjauan struktural. Tujuan struktural umum selalu untuk meminimumkan momen lentur, dan hal ini tidak dapat dicapai apabila kita menggunakan panjang bentang yang tak perlu. Tentu saja apabila dimensi a sangat kecil [misalnya lebih kecil daripada 10 ft (3m)], mungkin akan lebih baik kalau kita menggunakan kelipatan dari a untuk bentang struktural karena bentang yang lebih kecil dari kapasitas minimum untuk setiap sistem tidak ekonomis.

Pada situasi sangat khusus di mana ada jarak a yang relatif besar, penggunaan kecocokan yang lebih besar daripada satu-kepada-satu mungkin masih layak dan diinginkan. Dengan memperhatikan Gambar 13-9, misalnya, akan lebih menguntungkan apabila kita menggunakan elemen yang membentang secara horizontal yang panjangnya $2a$ dibandingkan dengan a apabila elemen yang digunakan dapat berfungsi lebih efektif pada bentang yang lebih panjang karena kemudahan konstruksi atau mungkin karena alasan lain. Hal ini kadang-kadang merupakan keadaan yang terjadi pada elemen beton pracetak (lihat Bab 14.2).

Pertanyaan yang dapat diambil dari ilustrasi dalam Gambar 13-9 adalah manakah



Gambar 13-9 Jenis-jenis kecocokan yang mungkin di antara pola fungsional dan pola struktural

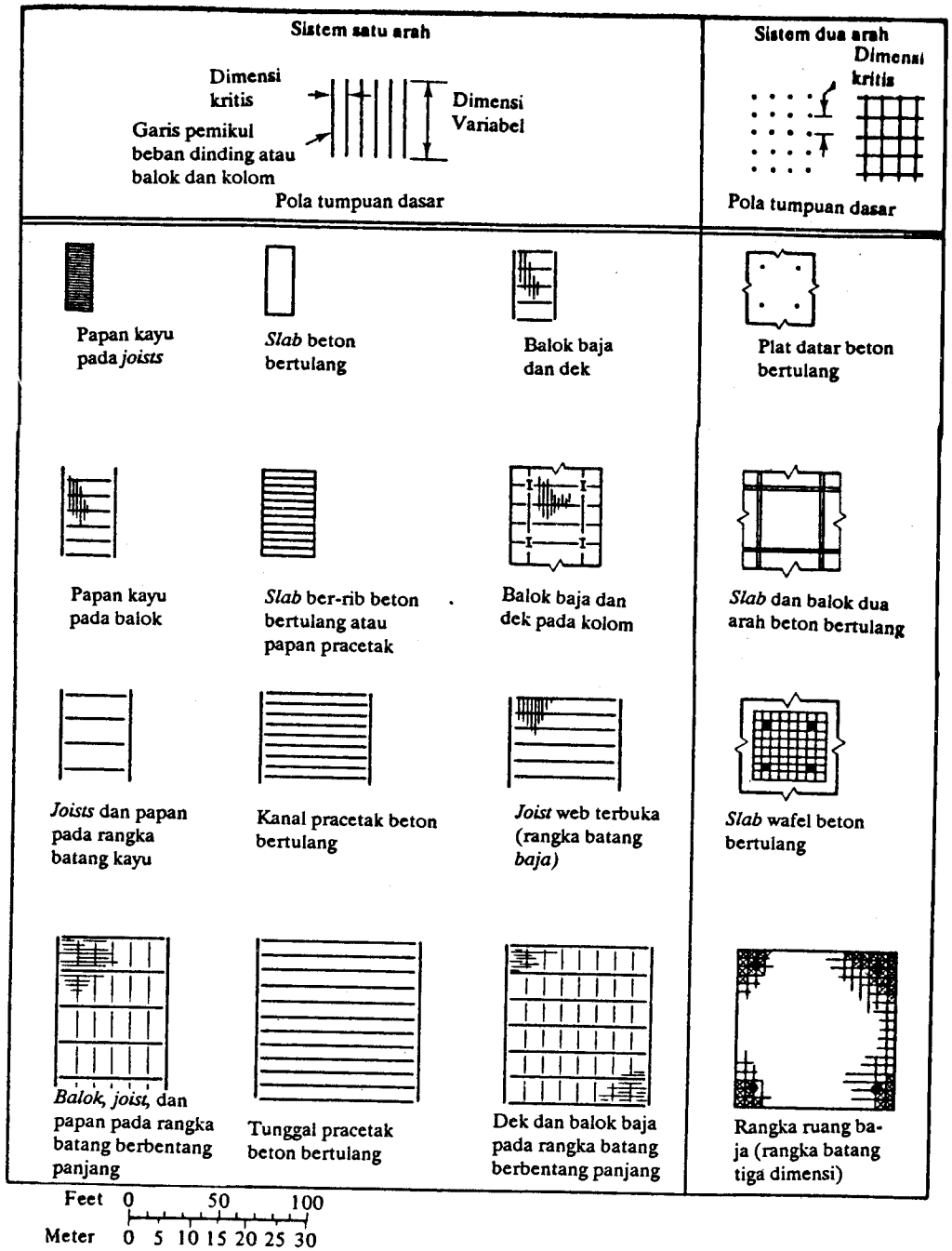
yang menurut tinjauan struktural yang bergantung pada hal-hal yang dibahas pada Bab 14 (misalnya panjang bentang, pembebanan). Pertanyaan ini berkaitan dengan apakah elemen dinding pada beberapa sistem pada gambar tersebut mungkin digunakan berdasarkan tinjauan fungsional. Juga manakah yang bergantung pada ukuran bentangnya (pentingnya proporsi bentang akan dibahas pada Bab 13.7). Berdasarkan tinjauan bentang itu saja, Gambar 13-10 mengilustrasikan beberapa bentang ekonomis untuk beberapa sistem struktural dua arah. Bab 14 dan 17 membahas hubungan antara sistem-sistem struktural dan bentang efektif secara lebih rinci.

Faktor lain yang dapat mempengaruhi derajat kecocokan adalah kondisi fondasi yang ada. Pada kondisi tertentu, beban-beban pada gedung dapat terdistribusi di seluruh lokasi sedemikian rupa sehingga beban yang ada pada titik diskret akan berkurang. Implikasi struktural dari hal ini adalah bahwa sistem grid yang ada harus *berbutir halus* dan memiliki kecocokan satu-kepada-satu. Apabila, sebaliknya, ada kondisi unik untuk jenis di mana ada lokasi yang menerima beban besar sementara di lokasi lain tidak ada beban sama sekali, maka pola strukturalnya harus merupakan respons terhadap kondisi tersebut, yaitu yang mempunyai elemen-elemen vertikal terpusat di titik-titik yang berkapasitas besar dan menggunakan elemen horizontal berbentang panjang yang menghubungkan titik-titik berkapasitas kecil. Dengan demikian, pola yang diperoleh adalah pola penumpu vertikal *berbutir kasar*.

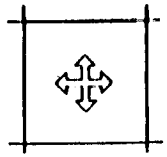
13.7 EFEK PROPORSI BENTANG: GRID BUJURSANGKAR DAN SEGIEMPAT

Apabila grid tumpuan itu bujursangkar, maka baik sistem yang membentang secara horizontal satu arah maupun yang dua arah dapat digunakan. Akan tetapi, perlu diingat bahwa sistem dua arah umumnya merupakan sistem yang lebih cocok apabila panjang bentangnya pendek atau menengah. Khususnya, apabila sistem tumpuannya adalah grid bujursangkar yang terdiri atas dinding-dinding pemikul beban (lihat Gambar 13-11), manfaat penuh dari penggunaan aksi dua arah (lihat Bab 10) dapat diperoleh sehingga sistem ini sangat diinginkan. Sistem satu arah tidak akan dapat memanfaatkan keuntungan penggunaan kemampuan tumpuan dinding-dinding yang sejajar dengan elemen-elemen yang membentang sehingga umumnya sistem satu arah ini memerlukan tinggi struktural lebih besar, yang berarti pula volume, dibandingkan dengan sistem dua arah.

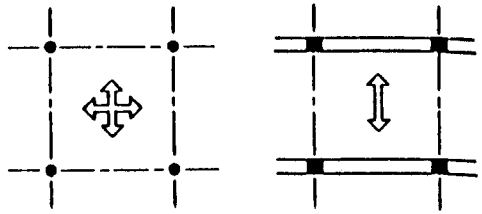
Masalah lain yang ada di antara sistem satu arah dan sistem dua arah untuk grid bujursangkar adalah dimensi absolut yang ada di antara titik-titik tumpuan. Sebagaimana akan dibahas pada bab-bab berikut ini, banyak macam sistem struktural dua arah yang dapat digunakan untuk bentang pendek sampai menengah [misalnya 15 sampai 40 ft (5 sampai 13 m). Sementara itu, apabila dimensi bentang sangat panjang, sistem satu arah umumnya digunakan untuk grid bujursangkar karena tidak banyak tersedia konstruksi dua arah berbentang panjang. Untuk bentang sampai sekitar 60 ft (18 m), masih ada sistem beton dua arah yang umum digunakan. Untuk bentang-bentang yang lebih besar lagi, sistem rangka ruang baja dua arah dapat digunakan, tetapi umumnya tidak cocok untuk beban lantai yang sangat



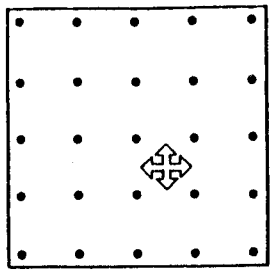
Gambar 13-10 Karakteristik pola dasar dari elemen yang membentang vertikal dan horizontal pada berbagai sistem struktural bidang. Bentang yang diperlihatkan ini khas (lihat Bab 14 dan 15).



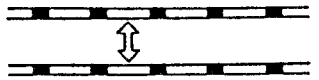
(a) Tumpuan dinding yang efektif dapat dibuat dengan aksi dua arah. Sistem satu arah biasanya kurang diinginkan karena kemampuan memikul beban dari sekumpulan dinding tidak dapat dimanfaatkan.



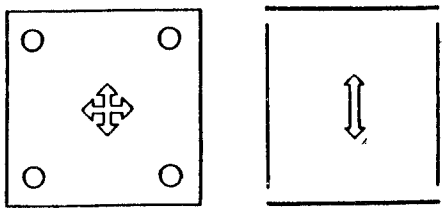
(b) Tumpuan kolom satu atau dua arah pada sistem mungkin digunakan.



(c) Agregasi secara seri dua arah: Apabila grid tumpuan bujursangkar ada pada kedua arah, maka sistem dua arah cocok digunakan.



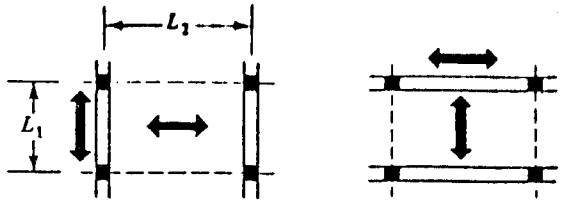
(d) Agragasi secara seri satu arah : Apabila grid tumpuan bujursangkar membentuk pola linear, maka pola satu arah umumnya lebih cocok dipakai dibandingkan dengan sistem dua arah.



(e) Struktur sel tunggal: Pembatasan bentang untuk sistem-sistem yang ada sering kali menyebabkan sistem satu arah lebih cocok daripada sistem dua arah apabila dimensi bentang sangat besar.

Gambar 13-11 Sistem penumpu vertikal: pola bujursangkar

besar. Struktur grid dua arah yang dibuat secara khusus, baik dari beton bertulang maupun dari baja, dapat digunakan, tetapi sistem ini relatif mahal. Jadi, untuk bentang bujursangkar besar, cara satu arah umumnya digunakan karena masing-masing elemen pada sistem ini dapat didesain dengan mudah untuk memikul persyaratan bentang dan beban yang ada. Sementara itu, pada kenyataannya bentang bujursangkar besar sangat jarang dijumpai dalam praktek.



(a) (b)

Gambar 13-12 Sistem tumpuan vertikal: pola segiempat. Sistem satu arah biasanya lebih disukai apabila sistem tumpuan vertikal membentuk pola segiempat. Aksi dua arah tidak akan terlihat jelas kecuali apabila perbandingan dimensinya (panjang banding pendek) kurang dari 1 : 1,5.

Apabila sistem tumpuan berbentuk benar-benar segiempat (lihat Gambar 13-12), sistem yang membentang secara horizontal satu arah mungkin lebih baik daripada yang dua arah. Sebagaimana telah dibahas pada Bab 10, aksi struktural dua arah terlihat nyata apabila dimensi bentang-bentangnya tidak sama. Struktur akan lebih mendekati sifat sistem satu arah apabila dimensi perbandingan dimensinya di luar selang 1 : 1 dan 1 : 1,5.

Apabila sebuah kolom yang menumpu suatu bentang adalah segiempat, dan pada struktur tersebut digunakan elemen yang membentang satu arah, maka pertanyaan dasar yang mungkin timbul adalah mana di antara susunan pada Gambar 13-12(a) dan 13-12(b) yang lebih tepat digunakan. Dalam hal Gambar 13-12(a), balok-balok pada bentang panjang hanya memikul beban terdistribusi merata, sementara elemen pada bentang pendek berfungsi sebagai balok kolektor yang memikul reaksi dari elemen struktur bentang panjang. Hal sebaliknya juga berlaku seperti terlihat pada Gambar 13-12(b). Tidak ada hal yang dapat memastikan sebelumnya apakah kedua-duanya memerlukan jumlah material yang sama untuk memikul beban dan bentang yang ada, juga apakah tinggi struktural yang diperlukan juga sama. Dengan demikian, dapat diharapkan bahwa salah satu cara dapat lebih layak digunakan menurut salah satu atau kedua kriteria tersebut untuk suatu kondisi dimensi dan pembebanan yang diberikan. Pertanyaan mengenai cara manakah yang menentukan elemen yang membentang secara primer adalah hal yang sangat menarik berdasarkan tinjauan teoretis. Sayangnya, pertanyaan ini tidak mudah dijawab. Sekalipun demikian, untuk suatu kasus khusus, apabila dimensi, beban, dan material telah diketahui, kedua pendekatan (satu atau dua arah) dapat dibandingkan dengan cara mendesainnya hingga mendapat tinggi struktural dan volume material. Sebagai contoh, apabila L_1 = 30 ft (9 m) dan L_2 = 80 ft (24 m) serta beton bertulang digunakan, maka salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah menggunakan satu penampang T beton pracetak pada arah bentang panjang (elemen ini hanya baik untuk beban terdistribusi) dan dua balok beton bertulang di tempat yang berfungsi sebagai kolektor pada arah pendek. Apabila alternatif lain digunakan, mungkin harus dilakukan desain dan pembuatan balok-balok kolektor bentang panjang (meskipun lebih kecil, elemen-elemen papan *prefabricated* dapat digunakan pada arah pendek).

Tinggi dan volume struktural untuk kedua sistem tersebut dapat dievaluasi sesudah elemen struktur ditentukan. Biaya dapat dipandang sebagai tinjauan penting seperti misalnya interaksi struktur dengan komponen gedung lain. Dengan demikian, pernyataan mengenai hal tersebut di atas dapat dibuat sesuai dengan kriteria-kriteria yang ada.

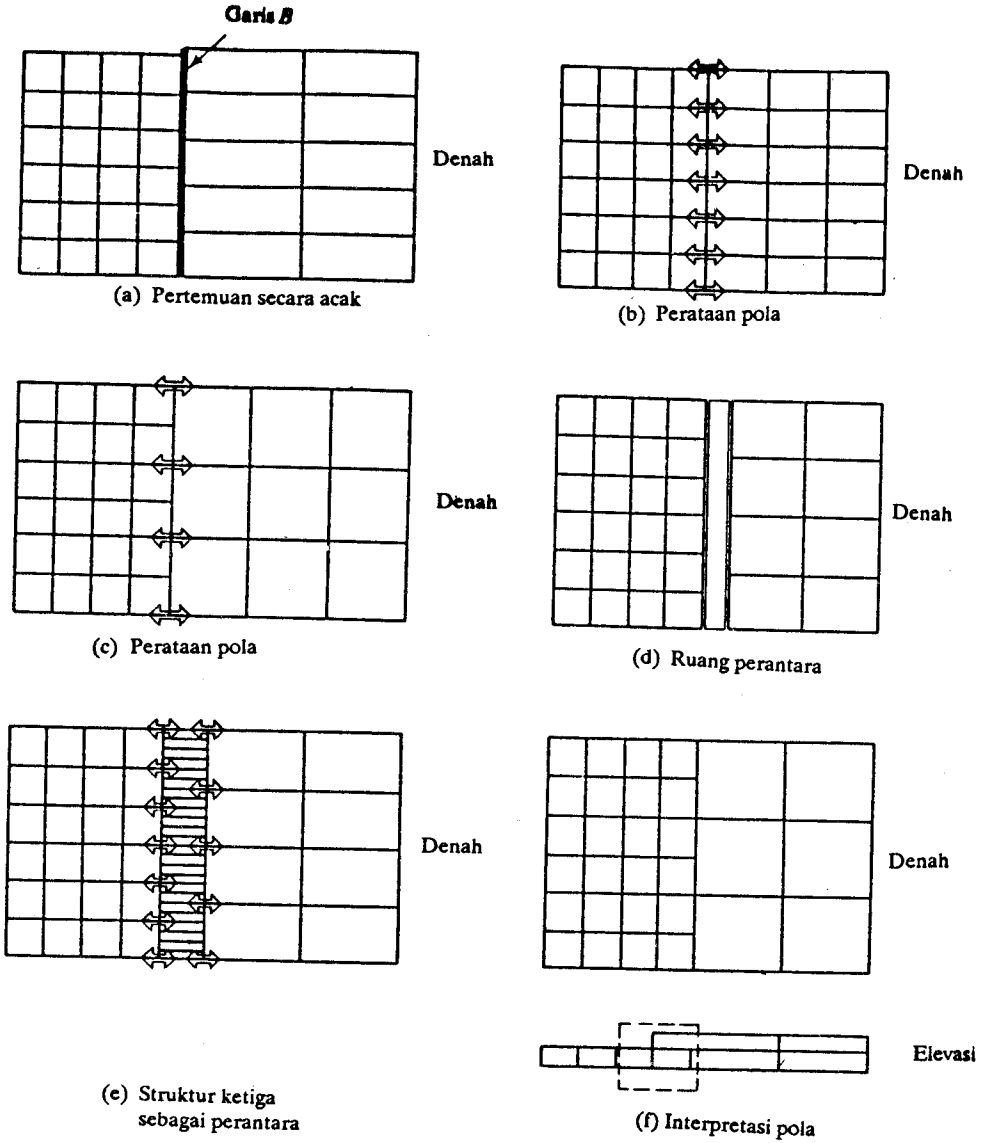
Tidak ada jawaban yang pasti mengenai cara mana yang lebih diinginkan pada bentang segiempat. Umumnya, tetapi tidak selalu, semakin panjang dimensi absolut bentang panjang ($L2$), akan semakin perlu digunakan solusi seperti terlihat pada Gambar 13-12(a) di mana elemen panjang memikul beban terdistribusi merata dan tidak berfungsi sebagai kolektor. Kolektor dibuat sependek mungkin. Apabila dimensi absolut kecil (jadi, tinggi kolektor tidak berlebihan) dan apabila kolektor maupun elemen pemikul beban permukaan dapat merupakan *off-the-shelf item* (bukan yang dibuat secara unik), maka pendekatan lainnya lebih disukai.

13.8 PERTEMUAN GRID STRUKTURAL

Banyak gedung yang menggunakan lebih dari satu pola struktural. Ada berbagai alasan penggunaan banyak pola seperti ini. Salah satu yang sering terjadi adalah adanya persyaratan terprogram pada gedung yang menghendaki variasi mengenai dimensi bentang bersih minimum. Untuk memenuhi variasi ini dapat terjadi penggunaan satu atau lebih pola fungsional standar. Keadaan lain, misalnya untuk memenuhi kendala fisis seperti kondisi fondasi tak seragam, juga dapat mengharuskan penggunaan grid struktural yang berbeda untuk lokasi berbeda pada satu gedung. Apabila lebih dari satu pola struktural umum digunakan pada satu gedung, maka masalah desain dasarnya adalah menentukan titik-titik pertemuan yang pada umumnya memerlukan perlakuakn khusus atau juga elemen-elemen khusus.

Tinjaulah dua grid struktural seperti terlihat pada Gambar 13-13(a). Apabila kedua sistem ini dipertemukan, jelas bahwa struktur yang berada pada daerah pertemuan tidak dapat dicirikan sebagai salah satu grid yang membentuknya. Seandainya balok digunakan di seluruh garis B, misalnya, balok itu akan mengalami beban yang berbeda dengan beban yang diterima oleh grid di kiri maupun di kanannya. Dengan demikian, balok pertemuan tersebut harus didesain secara khusus. Selain itu, mungkin diperlukan kolom tambahan.

Gambar 13-13 mengilustrasikan beberapa cara dasar untuk desain pertemuan pola. Tentu saja ada cara-cara lain yang dapat digunakan. Salah satu perantara dapat saja berupa jalur ruang itu sendiri yang dalam hal ini masalahnya dapat dihindari dengan memisahkan kedua sistem umum [lihat Gambar 13-13(d)]. Jenis perantara lainnya dapat berupa sistem struktural ketiga. Sistem ketiga ini harus selalu merefleksikan karakteristik kedua sistem yang digabungkan, atau sistem ketiga ini harus cukup fleksibel dalam beberapa hal. Grid struktural yang jauh lebih kecil daripada kedua sistem utama, misalnya, sering digunakan sebagai perantara kedua sistem utama tersebut [lihat Gambar 13-13(e)]. Sistem yang *berbutir halus* umumnya, tetapi tidak harus, terbuat dari material yang berbeda dengan sistem utama. Sistem utama, misalnya, dapat dibuat dari beton bertulang cor di tempat, sementara sistem perantara dapat merupakan sistem baja ringan. Pencampuran material secara ter-



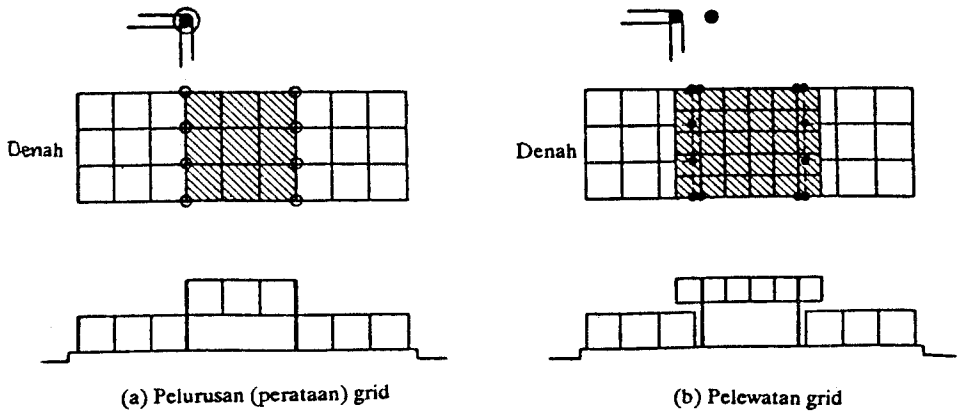
Gambar 13-13 Cara-cara dasar untuk pertemuan pola struktural umum

kontrol ini biasanya dapat diterima menurut tinjauan ekonomis. Sebaliknya, pencampuran material pada sistem utama biasanya lebih sulit. Keuntungan penggunaan sistem perantara *berbutir halus* ini memudahkan perencana dalam menentukan letak grid utama. Garis grid utama, misalnya, tidak harus selalu rata. Gedung yang terlihat pada Gambar 13-6 adalah contoh struktur yang menggunakan perantara *berbutir halus* tersebut. Dinding pemikul beban juga sering digunakan sebagai elemen

perantara ketiga, khususnya apabila sistem-sistem primernya tidak rata seperti terlihat pada Gambar 13-13(a). Akan tetapi, kita dapat juga menggunakan dinding pemikul beban pada grid menerus yang mempunyai jarak grid sangat kecil.

Cara lain untuk menghubungkan pola-pola juga ada, misalnya cara interpenetrasi seperti terlihat pada Gambar 13-13(f), sebagai variasi dari cara perataan (alignment) dasar.

Pertemuan pola juga dapat merupakan masalah apabila kita harus menggunakan satu grid di atas grid lainnya. Situasi ini umumnya muncul apabila kita ingin meletakkan sistem atap yang mempunyai satu geometri grid di atas satu sistem internal yang mempunyai geometri berbeda. Dalam hal ini, cara perataan umum digunakan apabila titik-titik tumpuan vertikal dimiliki oleh kedua sistem [lihat Gambar 13-14(a)]. Sistem perataan digunakan pada gedung dalam Gambar 13-4. Cara lainnya, yaitu jenis *melintas*, umum digunakan apabila titik-titik tumpuan vertikal untuk grid atas tidak berimpit dengan titik-titik tumpuan vertikal grid bawah. Cara terakhir ini sering digunakan apabila struktur bagian atas (misalnya atap) mempunyai bentang relatif panjang dibandingkan dengan di bawahnya, dan mempunyai pola internal yang berbeda dengan di bawahnya. Bagian struktur yang merupakan *overhang* tidak harus terbuat dari material yang sama meskipun memang dapat. Apabila pola-pola grid yang menumpang-tindih sangat mirip, material yang sama dapat digunakan. Apabila sangat berbeda, material berbeda umumnya digunakan.



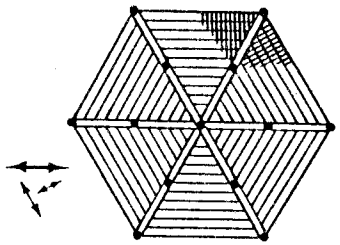
Gambar 13-14 Cara-cara dasar untuk menyusun pola-pola struktural berlapis

13.9 IMPLIKASI BENTUK GEDUNG

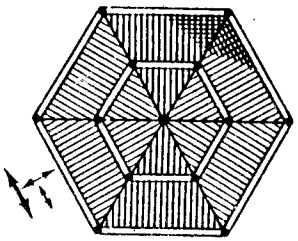
Skala dan geometri menyeluruh pada suatu gedung sering kali merupakan penentu desain utama untuk sistem struktural yang akan digunakan. Gedung langsing sangat tinggi, yang pada umumnya mengalami beban lateral, misalnya, umumnya membutuhkan cara pendekatan struktural yang berbeda dengan gedung bertingkat rendah. Juga geometri gedung tertentu mungkin saja memerlukan struktur khusus apabila dibebani secara unik, misalnya beban gempa. Respons struktur untuk situasi

seperti ini dibahas pada Bab 14. Pada Bab 13.9 ini dibahas masalah pada geometri yang umum dijumpai pada banyak gedung yang mempengaruhi pemilihan struktur.

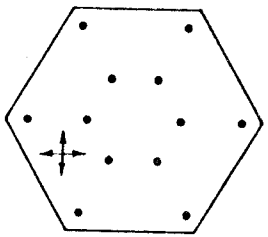
Contoh nyata mengenai hal ini adalah denah lingkaran, yang umumnya memerlukan elemen struktural, baik melingkar (pada kelilingnya) maupun radial. Denah ini juga mungkin digunakan pada struktur kubah bola atau struktur pneumatik (lihat Gambar 13-15). Bentuk segitiga dan bentuk-bentuk lainnya juga diperlihatkan pada gambar tersebut dan memberikan respons yang sama.



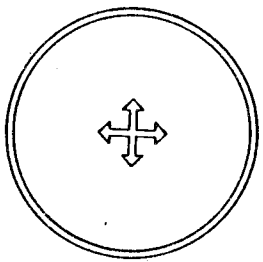
(a) Sistem balok-dan-kolom radial satu arah untuk konfigurasi lingkaran atau heksagonal



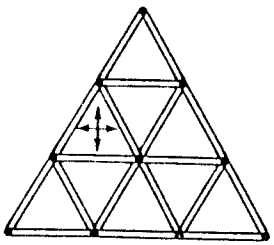
(b) Sistem balok-dan-kolom keliling satu arah untuk konfigurasi lingkaran atau heksagonal



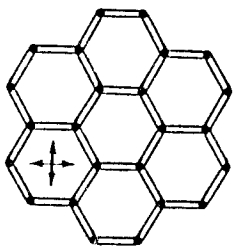
(c) Sistem plat datar dua arah (tanpa balok) untuk konfiguasi lingkaran atau heksagonal



(d) Struktrur *pneumatik* atau cangkang tiga dimensional untuk konfigurasi lingkaran



(e) Sistem *slab*-dan-balok dua arah untuk konfigurasi segitiga

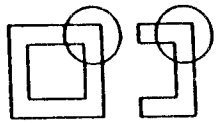


(f) Sistem *slab*-dan-balok dua arah untuk pola heksagonal

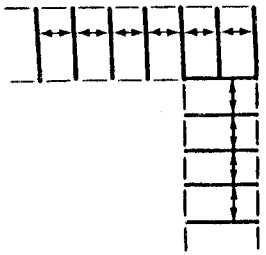
Gambar 13-15 Pengaruh beberapa geometri gedung khusus terhadap cara struktural. Struktur ini khas mempunyai denah lingkaran, heksagonal, dan segitiga.

Selain kasus-kasus yang jelas di atas, banyak kondisi yang mempengaruhi pemilihan struktural. Apabila diperlukan membuat bengkokan, distorsi, atau hal-hal lain yang tidak biasa pada grid struktural, tentu ada implikasi struktural. Bahkan pengakhiran suatu grid sekalipun, misalnya, biasanya memerlukan perlakuan khusus.

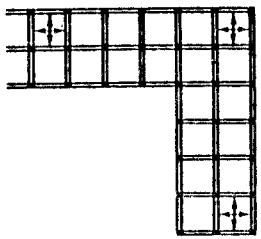
Perhatikan denah pada Gambar 13-16(a) di mana semua gedung mempunyai pojok. Pada banyak situasi, pembentukan daerah pojok dapat menimbulkan masalah.

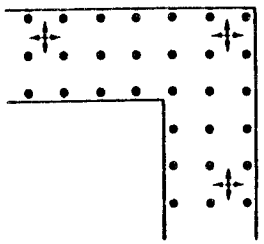


(a) Kondisi pojok khas

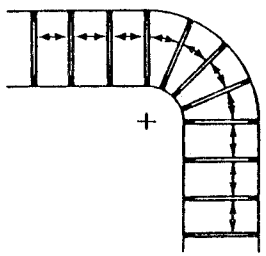


(b) Sistem satu arah: Membelokan pojok dengan sistem satu arah biasanya membingungkan

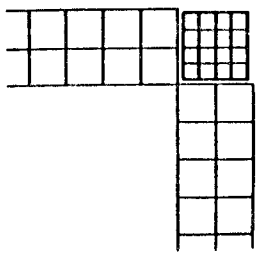




(c) Sistem dua arah: Membelokkan pojok dengan sistem dua arah biasanya tidak ada masalah.



(d) Cara sumbu membengkok



(e) Struktur transisi.

Gambar 13-16 Pengaruh morfologi gedung terhadap cara struktural. Cara dasar untuk membuat pojok

Anggap bahwa modul fungsional pada gedung tersebut pada dasarnya segiempat seperti terlihat pada Gambar 13-16(b). Ini merupakan pola yang sangat umum pada banyak jenis gedung, seperti perumahan, di mana setiap modul merupakan unit tempat tinggal. Jelas bahwa jenis dasar pola ini menghasilkan sistem struktur yang menggunakan balok-balok sejajar atau dinding pemikul beban di seluruh tinggi gedung dan sistem satu arah yang membentang di antara elemen-elemen tersebut. Kesulitan yang ada dalam menggunakan sistem demikian hanyalah di pojoknya di mana sistem satu arah tidak dapat mempunyai orientasi sekaligus pada kedua arah. Jadi, perlu ada cara khusus, misalnya seperti terlihat pada Gambar 13-16(b). Apabila cara tersebut mungkin dilaksanakan, tentunya keindahan menjadi berkurang. Kesulitan dasar itu tentu saja bukan merupakan masalah struktural, melainkan merupakan masalah pola segiempat dan persyaratan di pojok. Sebagai akibatnya, strukturnya yang sudah logis untuk setiap sisi pada gedung menjadi membingungkan di bagian pojoknya.

Tinjaulah jenis lain pola fungsional yang terdiri atas bentuk-bentuk bujursangkar [lihat Gambar 13-16(c)]. Dalam kasus ini pola dasarnya menggunakan sistem struktural dua arah yang ditumpu oleh kolom-kolom pada garis pertemuan. Jelas pada kasus ini bahwa tidak ada kesulitan sama sekali dalam membentuk struktur di daerah pojok. Sistem dua arah itu secara alami mempunyai kemampuan untuk membentuk pojok karena kesimetrisannya dalam hal geometri dan perilaku struktural. Dengan demikian, apabila kondisi bentuk L ada pada suatu gedung, grid struktural dan fungsional bujursangkar (bukan segiempat) yang digunakan. Bagaimana pun, aturan mengenai hal ini adalah penyederhanaan karena grid bujursangkar dapat tidak memenuhi persyaratan fungsional gedung sebagaimana bentuk segiempat (perumahan adalah contoh mengenai hal ini). Selain itu, masih banyak masalah struktural yang efektif.

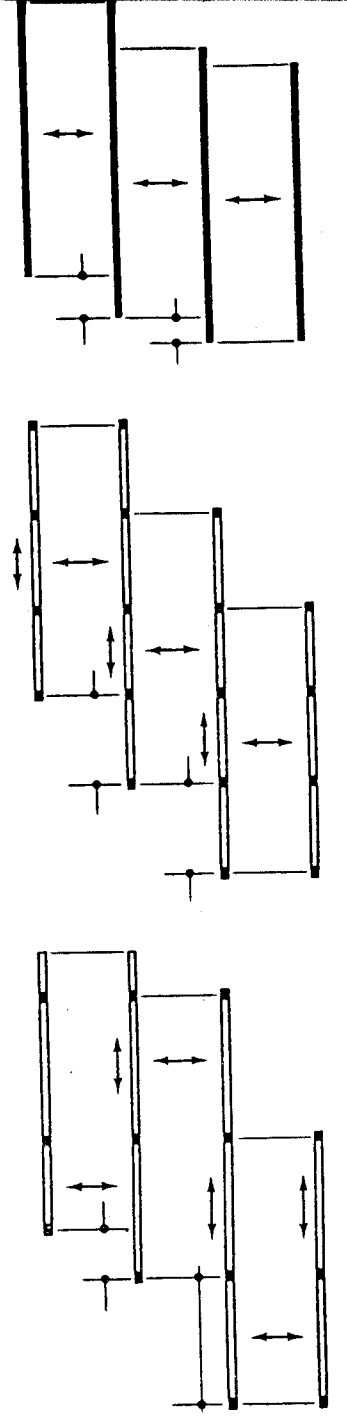
Beberapa pola struktural lain yang membentuk pojok diilustrasikan dalam Gambar 13-16(d) dan (e). Tentu saja sumbu-sumbu grid dasar pada pola ini dapat dengan mudah *membengkok* di sekitar pojok secara radial. Apabila sistem sumbu yang membengkok ini dapat digunakan, maka sistem struktural satu arah yang menggunakan elemen *prefabricated*, tetapi tidak selalu, sulit digunakan. Ada kesulitan konstruksi dalam membentuk permukaan yang panjangnya berubah-ubah pada daerah bengkokan apabila material baja atau kayu digunakan karena panjang elemen struktur tidak konstan. Yang mungkin cocok digunakan adalah sistem beton bertulang dua arah cor di tempat yang menggunakan balok radial dan *slab* dua arah sederhana. Sekalipun demikian, sebagaimana akan dibahas pada Bab 14 dan 15, panjang bentang pada sistem ini terbatas. Alternatif lain adalah menggunakan plat datar dua arah di daerah sumbu yang membengkok. Pada sistem ini, panjang bentang juga terbatas. Pada umumnya, sistem sumbu membengkok sulit dilaksanakan apabila jarak bentang di antara garis grid cukup besar.

Cara lain mengatasi kondisi pojok terlihat pada Gambar 13-16(e). Dalam kasus ini, sistem utama dengan mudah dihentikan di kedua batas pojok, dan digunakan struktur *transisi*. Struktur transisi ini selalu mempunyai karakteristik dua arah dan umumnya *berbutir halus*. Salah satu cara yang dibahas pada Bab 13.8 pada pertemuan pola harus digunakan pada pertemuan antara struktur grid utama dan

(a) Pada sistem dinding pemikul beban, besar *slip* (penggeseran) mudah diubah-ubah.

(b) Pada sistem balok-dan-kolom yang mempunyai kolom-kolom seragam berjarak seragam, besar penggeseran lebih disukai sama dengan jarak kolom.

(c) Sistem balok-dan-kolom tidak memberikan fleksibilitas dalam menetukan besar penggeseran dan lokasi tumpuan (kolom dapat diletakkan di mana saja pada garis tumpuan tanpa menimbulkan kesulitan yang berarti). Keteraturan yang terlihat pada (b), bagaimanapun, umumnya menghasilkan struktur yang efisien.



Gambar 13-17 Beberapa cara dasar untuk gedung yang terdiri atas *slipped-units*

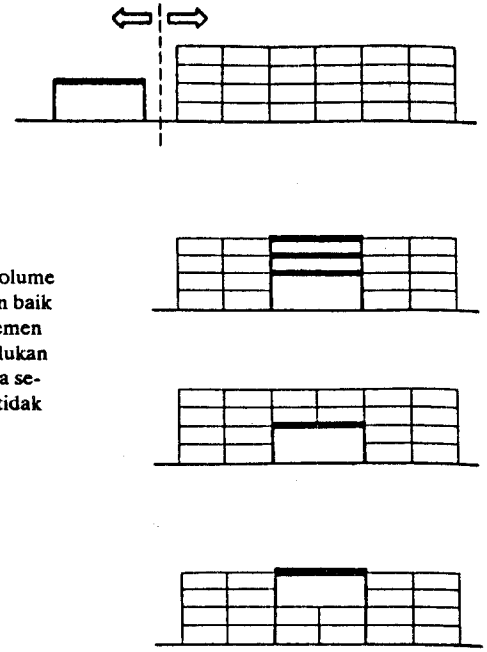
struktur transisi. Struktur transisi itu dapat terbuat dari material yang sama dengan struktur primer, atau dapat pula terbuat dari material yang berbeda sama sekali. Cara ini tidak tepat digunakan apabila gedungnya relatif kecil dan tinggi absolut gedung relatif rendah. Sebaliknya, pada gedung besar yang relatif tinggi, cara struktur transisi ini cukup cocok.

Geometri gedung yang umum dijumpai adalah yang terdiri atas *slipped-units*. Pada gedung seperti ini, sistem struktural satu arah biasanya lebih cocok daripada sistem dua arah. Sistem satu arah yang menggunakan dinding pemikul beban, misalnya, dapat mempunyai inkremen kecil *slip* (gelincir) [lihat Gambar 13-17(a)]. Apabila bukan dinding pemikul beban, melainkan sistem balok-dan-kolom yang digunakan, maka derajat gelincir yang diinginkan adalah yang sehubungan dengan jarak normal antara kolom-kolom [lihat Gambar 13-17(b)]. Jenis sistem yang sama ini dapat digunakan untuk menggeser lokasi kolom di sepanjang garis tumpuan. Dengan demikian, jarak antara kolom dapat berbeda-beda di sepanjang garis tumpuan (khususnya apabila bentang balok kecil). Hal ini tentu saja tidak untuk mengatakan bahwa manipulasi tersebut memang dikehendaki berdasarkan tinjauan struktural ataupun konstruksional. Fleksibilitas demikian pada umumnya sangat penting berdasarkan tinjauan fungsional. Sistem dua arah, bukan plat datar yang bentangnya terbatas, tidak mempunyai fleksibilitas tersebut.

13.10 GRID TAK SERAGAM

Pada situasi di mana pola sistem tumpuan vertikal tidak teratur (irregular), ada sistem struktural yang lebih baik digunakan dibanding dengan yang lainnya. Di satu pihak ada sistem struktur yang menggunakan grid iregular total, sementara di pihak lain ada sistem yang menggunakan unit modul yang benar-benar berulang (misalnya elemen-elemen beton pracetak). Agar keuntungan dapat diperoleh dari kemungkinan-kemungkinan proses konstruksi pada sistem-sistem tersebut, harus diusahakan agar penggunaannya berulang. Sistem beton cor di tempat biasanya lebih baik digunakan dalam hal pola iregular karena dengan sistem ini ketidak teraturan dapat dengan mudah diatasi (lihat Gambar 13.18). Begitu pula sistem *joist* kayu yang dibuat di lokasi lebih dikehendaki daripada yang *prefabricated*. Yang disebut terakhir ini lebih cocok digunakan secara berulang di atas sistem tumpuan vertikal teratur.

Gambar 13-18 Untuk grid *irregular* (tak beraturan), sistem struktural yang dibuat di lokasi (misalnya beton cor di tempat) biasanya lebih dikehendaki dibandingkan dengan yang menggunakan elemen-elemen yang dibuat di luar lokasi.



(a) Cara separasi (pemisahan): Pemisahan sederhana antara volume besar dengan sistem yang lebih umum dapat menghasilkan respons struktural yang independen pada kedua sistem tersebut.

(b) Cara penanaman di tingkat bawah: Peletakan volume besar pada level rendah umumnya memerlukan baik elemen struktur transfer besar maupun elemen struktur berbentang panjang (yang tidak diperlukan secara fungsional). Kedua alternatif ini biasanya secara struktural mungkin dilakukan, tetapi tidak ekonomis.

(c) Cara penanaman di tingkat atap: Peletakkan ruang besar di tingkat atap tidak memerlukan penggunaan elemen struktur transfer beban besar sehingga sistem ini lebih ekonomis dibandingkan dengan sistem (b).

Gambar 13-19 Cara-cara mengakomodasikan volume besar pada sistem berbutir halus

Ketidakteraturan grid tumpuan vertikal biasanya dapat terjadi apabila titik-titik tumpuan mempunyai jarak relatif dekat. Apabila bentang horizontal menjadi lebih besar, maka persyaratan struktural untuk elemen struktur horizontal juga lebih besar. Untuk bentang maksimum sekitar 16 ft sampai 20 ft (5 sampai 6 m), sistem plat datar beton bertulang, yang dibahas secara lebih rinci pada Bab 15, dapat digunakan untuk membuat ketidakteraturan tersebut. Untuk bentang-bentang yang lebih besar di mana sistem tersebut sudah tidak layak lagi digunakan, ortogonalitas kaku yang diasosiasikan dengan sistem berbentang panjang dapat memberikan susunan tumpuan vertikal yang lebih teratur.

13.11 MENGAKOMODASIKAN RUANG BESAR

Pada banyak gedung, persyaratan fungsional dipenuhi dengan menggunakan grid-grid umum. Sementara itu, pada beberapa situasi ada persyaratan terprogram yang menghasilkan satu atau lebih ruang khusus yang berskala sangat berbeda dibandingkan dengan yang lainnya. Salah satu contohnya adalah sekolah di mana mungkin ada banyak ruang yang sama berukuran kecil (ruang kelas) dan ada beberapa ruang lain yang sangat besar (*gymnasium*, auditorium, atau kafetaria). Pembuatan kedua jenis ruang ini dapat menimbulkan masalah.

Gambar 13-19 mengilustrasikan beberapa cara dasar memasukkan sebuah volume besar ke dalam grid selular berbutir halus. Salah satu solusinya adalah *memisahkan* benar-benar kedua sistem tersebut dan menghubungkannya hanya di sepanjang tepinya atau dengan menggunakan cara penghubung tertentu. Sistem rangka batang baja satu arah berbentang panjang dapat dipilih untuk ruang besar, misalnya, dan struktur lain dipilih untuk sistem yang berbutir halus. Salah satu cara yang dibahas pada Bab 13.8 mengenai pertemuan pola-pola yang berbeda akan dipakai sebagai perantara. Kompleks auditorium pada gedung yang terlihat pada Gambar 13.6 adalah contoh yang menunjukkan bagaimana suatu volume besar dapat dengan mudah dipisahkan dan menggunakan sistem strukturalnya sendiri.

Cara yang benar-benar berlawanan dengan di atas juga sering digunakan di mana ruang besar *dimasukkan* ke dalam sistem berbutir halus. Ada dua hal yang menarik di sini – yang pertama adalah ruang lebih besar diletakkan sedemikian rupa sehingga sebagian besar sistem yang berbutir halus terletak di atas ruang tersebut, dan yang kedua adalah ruang besar diletakkan seluruhnya di atas sistem berbutir halus.

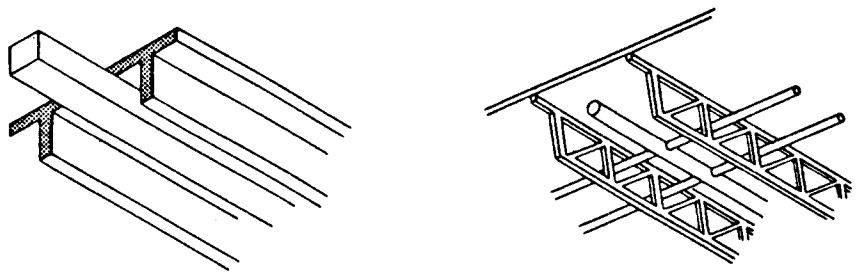
Apabila ruang besar dimasukkan pada tingkat rendah, ada beberapa masalah struktural. Ada dua pilihan struktural dasar [lihat Gambar 13-19(b)]. Yang pertama adalah menggunakan kecocokan struktural satu-kepada-satu dengan sistem berbutir lebih halus. Cara ini juga menggunakan sejumlah elemen struktur transfer besar untuk memikul beban dari tumpuan vertikal yang berjarak dekat di atas ruang terbuka, dan menyalurkannya ke tumpuan-tumpuan vertikal di tepi-tepi ruang besar tersebut. Cara demikian digunakan pada daerah auditorium pada gedung yang terlihat dalam Gambar 13-4. Pilihan cara kedua adalah yang menggunakan bentang dari ruang besar sebagai dimensi berulang dan menggunakan sederetan elemen struktur berbentang besar di banyak bagian meskipun pada daerah fungsional berbutir lebih halus. Jadi, pada pilihan ini digunakan cara kecocokan *longgar*.

Kedua cara mungkin saja dilakukan, tetapi kedua-duanya juga dapat menimbulkan masalah. Pada kasus pertama di mana elemen-elemen struktur transfer digunakan, jelas bahwa elemen-elemen ini harus mampu memikul seluruh beban yang sangat berat yang ada (elemen struktur *off-the-shelf* biasanya tidak dapat digunakan). Elemen-elemen struktur ini biasanya mempunyai masalah. Bagian struktur lainnya pada daerah berbutir halus masih dapat berfungsi dengan baik. Cara lain yang menggunakan elemen berbentang panjang di banyak bagian, yang kecocokannya longgar, tentu saja tidak ekonomis. Membuat bentang besar, sementara bentang yang lebih kecil dapat digunakan, biasanya tidak dapat menghasilkan struktur yang ekonomis. Penggunaan sistem khusus (misalnya beton bertulang prategang atau pracetak berbentuk T), yang didesain secara khusus untuk bentang panjang itu, dapat mengurangi kerugian tersebut.

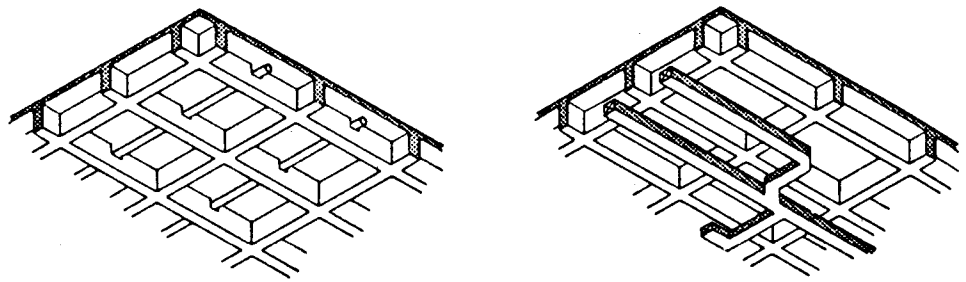
Perlu diingat bahwa hampir semua kesulitan yang disebutkan di atas dapat diatasi dengan meletakkan ruang berbentang besar di atas sistem grid yang lebih kecil. Selanjutnya, elemen-elemen yang berbentang besar hanya menerima beban atap yang relatif ringan. Desain sistem berbutir halus tidak begitu terpengaruh oleh adanya ruang besar di atasnya. Salah satu cara untuk membuat tumpang tindih antara berbagai pola yang dibahas pada Bab 13.8 dapat dilakukan. Kesulitan pada cara ini bukanlah masalah struktural, melainkan masalah fungsional. Kesulitan tersebut adalah karena ruang besar biasanya lebih cocok diletakkan di tingkat bawah karena alasan kemudahan akses – faktor penting yang perlu dipertimbangkan karena akan sangat banyak orang yang menggunakan ruang besar itu.

13.12 MENGAKOMODASIKAN KONDISI KHUSUS

Hampir selalu ada kondisi khusus pada suatu gedung yang mempengaruhi struktur yang digunakan. Kondisi itu biasanya menunjukkan kejadian-kejadian khusus sehubungan dengan fungsi gedung tersebut seperti kondisi sirkulasi (misalnya tangga) atau kondisi sistem layan gedung (misalnya pemanasan, pengaliran udara, dan pengondisian udara).



(a) Sistem yang membentang satu arah dapat dengan mudah mengakomodasikan elemen-elemen layan yang sejajar dengan elemen struktur utama. Bagian elemen layan vertikal biasanya ditanam dalam dinding.



(b) Cara penetrasi: Elemen layan minor biasanya dapat ditanam dalam material struktural dasar.

(c) Sistem yang melewati: apabila sistem layan horizontal bersifat kompleks atau mengandung elemen besar, maka cara yang efektif adalah tidak menggabungkan bidang elemen struktural dengan elemen layan.

Gambar 13-20 Pengakomodasian elemen-elemen layan horizontal

Ada beberapa cara dasar untuk mengakomodasikan elemen sistem layan ged yang terletak secara horizontal. Salah satunya adalah penggunaan sistem yang mem bentang satu arah yang secara alami sudah mempunyai ruang-ruang sejajar (lih Gambar 13-20). Selain pada rangka batang, elemen-elemen yang tegak lurus dengan arah membentang tentu saja sulit dibuat. Kita dapat saja membuat perubahan bentuk secara lokal dari bahan struktural dasar untuk mengakomodasikan hal tersebut. Hal ini sering dilakukan apabila elemen-elemen yang akan diakomodasikan tidak banyak dan atau berdimensi kecil. Kebanyakan sistem struktural dapat didesain untuk mengakomodasikan penetrasi minor pada elemen struktur horizontal.

Cara penetrasi seperti disebutkan di atas juga dapat digunakan untuk meng akomodasikan elemen-elemen horizontal pada sistem struktural dua arah seperti terlihat pada Gambar 13-20(b).

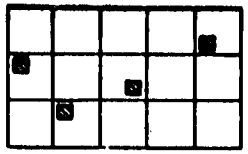
Beberapa sistem struktural, seperti rangka batang, dapat dengan mudah meng akomodasikan elemen layan horizontal karena sistem itu dapat dengan mudah melewati web elemen struktur. Selain pada sistem tersebut, biasanya apabila pene trasi semakin besar atau banyak, strukturnya lebih tepat dicirikan sebagai sebuah sementara, bukan sebagai sebuah sistem. Apabila hal ini terjadi, biasanya lebih disukai menggunakan cara lainnya.

Cara lain untuk mengakomodasikan elemen layan horizontal pada sistem satu maupun dua arah adalah dengan melewatkannya di atas sistem struktural primer dan membiarkannya terbuka atau tertutup oleh selubung atau plafon. Cara demikian sangat efisien menurut tinjauan konstruksi, tetapi tinggi total gedung menjadi bertambah.

Banyak sistem struktural yang dapat didesain untuk mengakomodasikan pene trasi minor untuk elemen fungsional dan layan vertikal tanpa ada kesulitan (Gambar 13-21). Untuk penetrasi yang lebih besar, misalnya tangga, perlu ada rangka lokal khusus tanpa harus mengubah sistem struktural dasarnya.

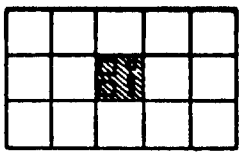
Salah satu cara untuk menangani situasi di mana banyak penetrasi vertikal diperlukan adalah dengan mengelompokkan fungsi khusus ke dalam *clusters* dan mendesain struktur itu untuk mengakomodasikan *cluster* tersebut. Hal ini sering dilakukan untuk elemen vertikal di mana elemen tersebut dikelompokkan ke dalam unit inti (core) yang cocok dengan bentang struktural individual. Pada bentang ini struktur tersebut diperlakukan khusus. Keuntungan dari melakukan hal ini adalah bahan struktural umum di lokasi lain tidak terganggu dan dapat tetap berfungsi secara efisien. Hal ini merupakan cara umum pada struktur bertingkat banyak.

Cara yang menggunakan *cluster* sering kali tidak dapat memenuhi persyaratan fungsional dari elemen-elemen layan. Banyak elemen yang harus didistribusikan di seluruh gedung, misalnya sistem pemanasan, pengaliran udara, pengondisian udara, atau sistem pemipaan laboratorium. Pada kondisi tertentu, suatu sistem struktur yang mempunyai ruang untuk meletakkan elemen-elemen tersebut pada selang tetap dapat menjadi efektif. Sistem seperti ini terlihat pada Gambar 13-21(c). Ruang antara balok-balok sejajar dan kolom rangkap dicadangkan untuk alat-alat mekanis. Pusat sains yang diilustrasikan pada Gambar 13-6 dan 13-22 mempunyai ruang-ruang di mana elemen layan mekanis diletakkan, yaitu di bagian belakang gedung. Laboratorium fisika dan kimia diletakkan pada bagian inti gedung. Bagian



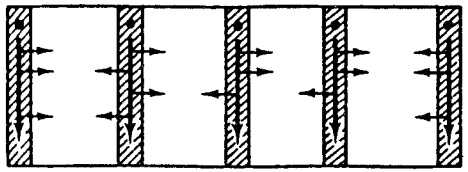
Denah

(a) Elemen layan vertikal: cara penetrasi. Untuk elemen vertikal minor yang terdistribusi secara acak, meterial struktural dasarnya pada umumnya dapat dipenetrasi.

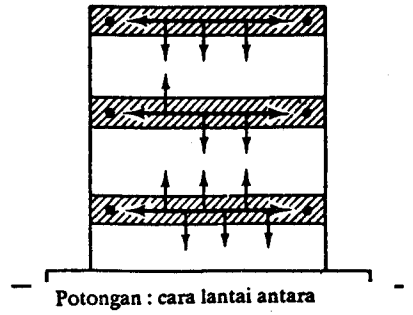


Denah

(b) Elemen layan vertikal dan keunggulan khusus: cara melewatkan dengan *cluster*. Apabila penetrasi elemen cukup besar atau kompleks, maka dilakukan cara di mana elemen-elemen dikelompokkan kemudian dilewatkan dari struktur dasarnya.



Denah : cara balok paralel



Potongan : cara lantai antara

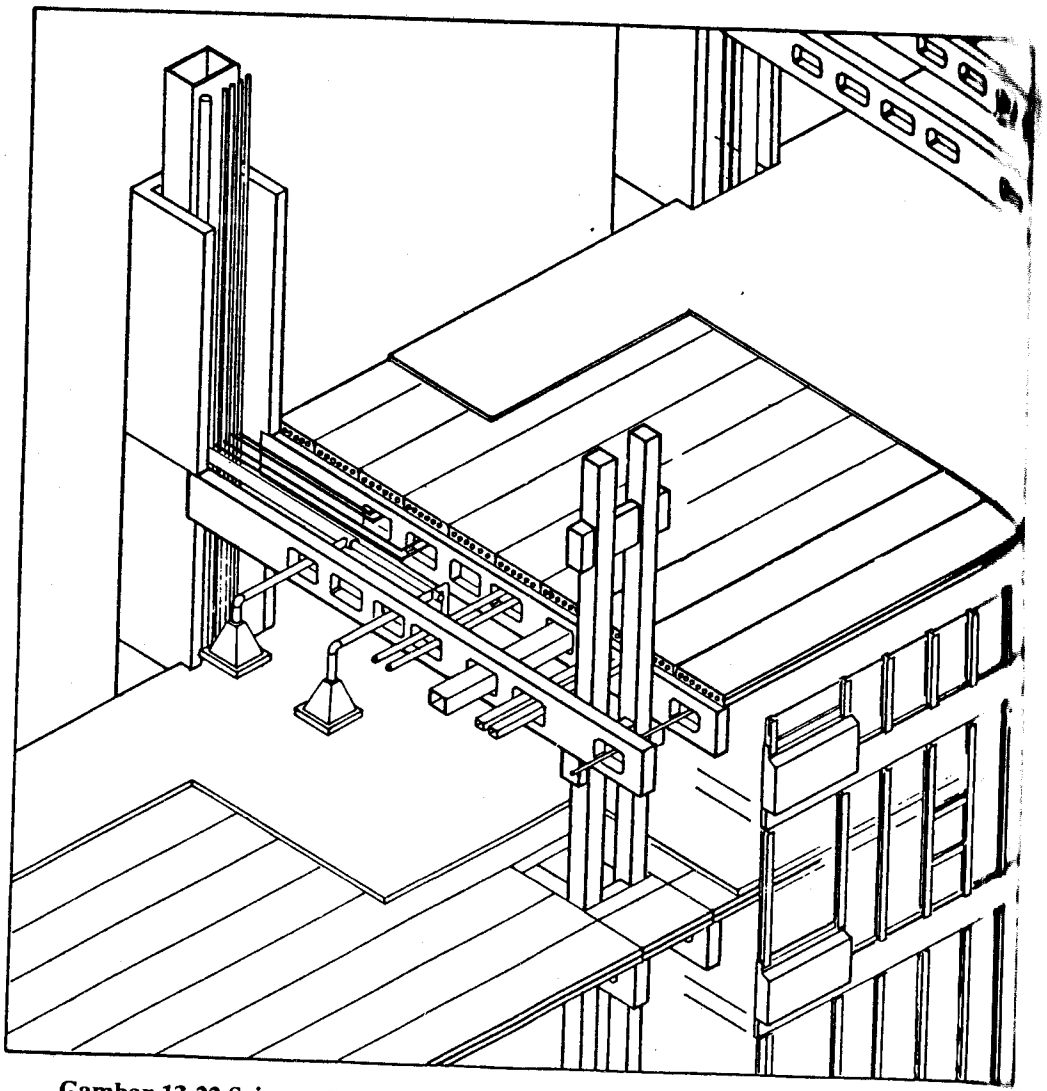
(c) Elemen vertikal dan horizontal: aturan untuk daerah antara. Kita dapat memberi daerah dengan jarak dengan jarak teratur untuk elemen layan horizontal dan atau vertikal. Melakukan hal ini cocok untuk kasus-kasus di mana elemen layan harus didistribusikan di seluruh gedung dan berukuran relatif banyak serta kompleks.

Gambar 13-21 Cara-cara untuk mengakomodasikan sistem layan gedung dan kondisi khusus

depan gedung digunakan untuk perpustakaan dan kantor, yaitu ruang yang tidak banyak memerlukan fungsi mekanis. Dengan demikian, pada bagian depan ini sistem balok-dan-kolom tunggal dapat digunakan.

Kesulitan yang secara konseptual ada pada penggunaan sistem struktural yang menggunakan interval tetap untuk meletakkan layan mekanis ialah kita tidak dapat mengetahui sebelumnya apakah jarak konstan tersebut dapat memberikan layan mekanis yang sudah baik. Memaksakan sistem mekanis untuk mengikuti pola sistem struktural kadang kala memang efisien berdasarkan tinjauan desain gedung secara keseluruhan. Apakah hal ini berlaku juga pada desain gedung, bagaimana pun, bergantung pada program gedung yang ada, juga banyak variabel desain lainnya.

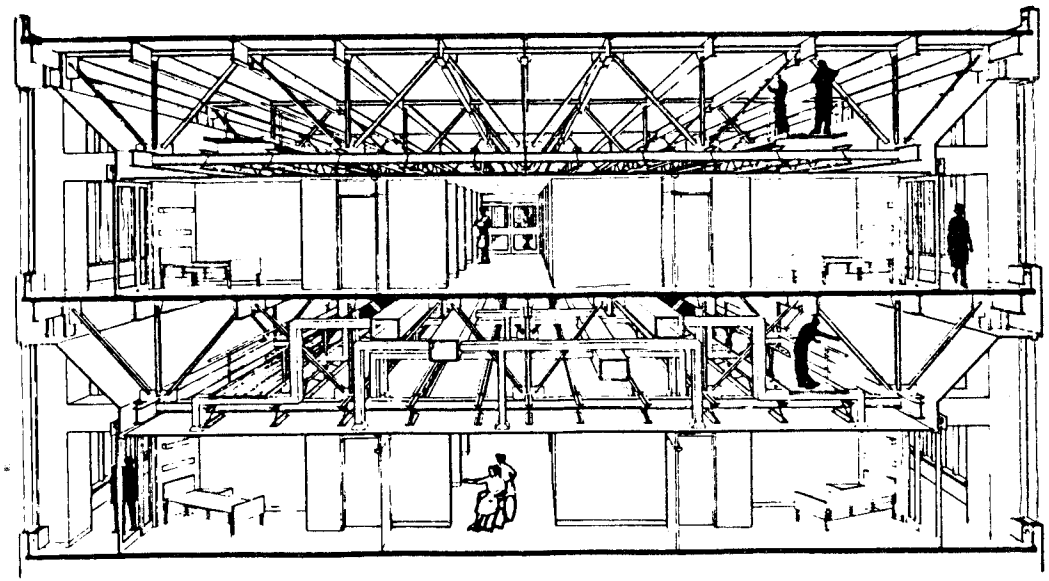
Daerah antara di mana terdapat *lapisan* layan di antara lantai, dapat digunakan apabila intensitas layan atau permintaan fleksibilitas memang menghendakinya.



Gambar 13-22 Science Center, Harvard University, Cambridge,Mass. Gedung ini dibuat dari elemen beton pracetak. Bagian laboratorium ini menggunakan sistem balok rangkap dan kolom yang memungkinkan distribusi layan mekanis dengan menggunakan ruang berjarak teratur di antara balok-balok [lihat juga Gambar 13-6 dan 13-21 (c)].

Elemen-elemen layan dapat keluar dari daerah antara ke lantai di atasnya atau di bawahnya di lokasi-lokasi yang diperlukan. Perubahan dan modifikasi juga dapat dilakukan tanpa harus mengganggu kegiatan fungsional. Suatu solusi struktural yang memanfaatkan tinggi penuh daerah antara sering kali, tetapi tidak selalu, menguntungkan (lihat Gambar 13-23).

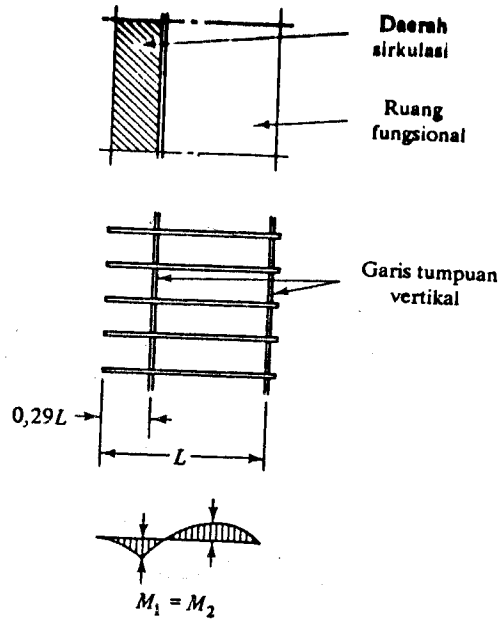
Secara umum, cara-cara yang sangat mahal digunakan hanya bila sistem mekanis dalam gedung sangat kompleks, misalnya di rumah sakit. Pada gedung-gedung yang intensitas mekanisnya rendah, misalnya gereja, cara itu biasanya tidak ekonomis karena elemen-elemen mekanisnya sedikit dan kecil. Jadi, ruang antara yang mahal seperti disebutkan di atas tidak ekonomis digunakan pada gedung demikian.



Gambar 13-23 Woodhull Medical and Mental Health Center, Brooklyn, N.Y. Ada tingkat khusus (yang dapat dilalui pekerja) untuk elemen mekanis. Elemen mekanis dapat dimodifikasi dan dipertahankan tanpa mengganggu aktivitas rumah sakit. Rangka batang satu arah tinggi digunakan untuk membentuk lapisan tambahan itu [lihat juga Gambar 13-21(c)]. (Atas izin Kallmann dan McKinnell, Russo dan Sonder, Associated Architects.)

13.13 PENGATURAN LOKASI TUMPUAN UNTUK MENGURANGI MOMEN LENTUR

Telah disebutkan pada bab-bab terdahulu dalam pembahasan balok dan rangka bahwa pengaturan lokasi tumpuan dapat meningkatkan efisiensi struktural, yaitu dengan memperkecil momen lentur yang ada. Beberapa cara penentuan lokasi itu mempunyai implikasi langsung pada pola struktural yang digunakan. Dalam banyak hal, apabila pola strukturalnya telah ditetapkan, pengaturan lokasi sudah tidak



Gambar 13-24 Pengoptimalan lokasi tumpuan. Dalam banyak hal, kecocokan antara pola tumpuan vertikal dan pola penggunaan gedung dapat berfungsi, baik berdasarkan tinjauan struktural maupun berdasarkan penggunaan gedung.

mungkin lagi dilakukan. Cara klasik untuk mengurangi momen lentur desain pada balok atau rangka batang, misalnya, adalah dengan menggunakan kantilever ujung (lihat Bab 4.4.10 dan 6.4.6). Pada proses menyeluruh pemilihan pola struktural dalam gedung, kita mungkin menggunakan kantilever pada gedung itu. Sebagai contoh, aturan yang sederhana dan cepat untuk itu ialah bahwa $(1/5)L$ dan $(1/3)L$ seperti telah dibahas pada Bab 6 yang dapat merupakan panjang kantilever optimum untuk elemen struktur homogen, pada umumnya menghasilkan dimensi kantilever yang berfungsi baik pula sebagai daerah sirkulasi. Implikasi pola seperti ini tentu saja penting (lihat Gambar 13-24). Contoh lain adalah yang menggunakan balok menerus dan rangka.

13.14 KARAKTERISTIK PEMBENTUKAN-RUANG

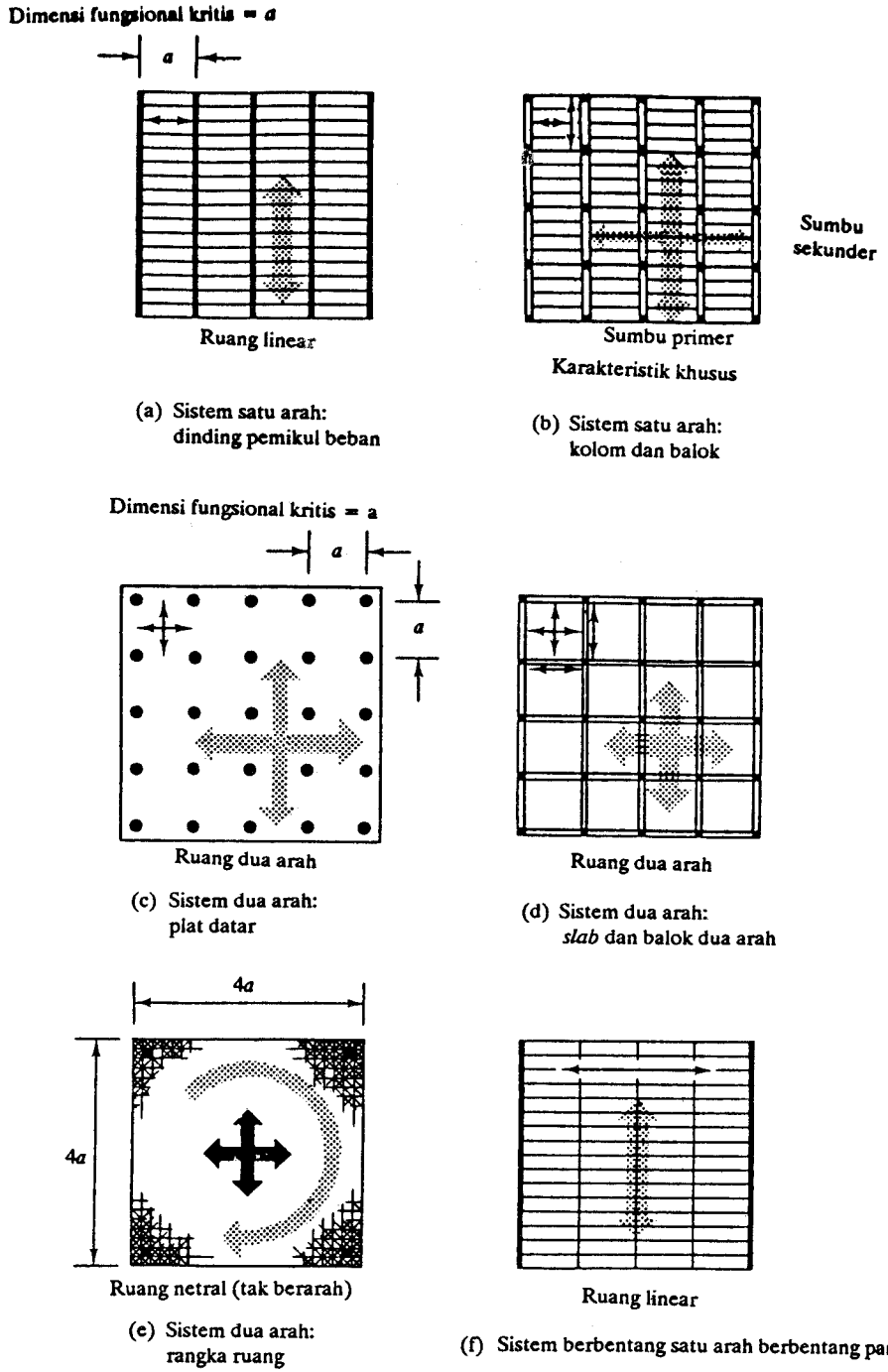
Tinjauan subjektif yang tidak diragukan lagi penting menurut segi arsitektural adalah apakah sistem-sistem yang diilustrasikan mempunyai implikasi ruang yang berbeda-beda. Ruang-ruang (dalam arti tiga dimensional) yang dibentuk dengan sistem pemikul dinding (Gambar 13-25(a)] adalah satu arah (atau garis-garis) dan mempunyai kualitas planar yang kuat yang diberikan oleh elemen-elemen horizontal dan vertikal penutupnya.

Ruang yang dibentuk dengan sistem balok-dan-kolom (Gambar 13-25(b)] juga terutama satu arah yang mempunyai balok-balok kolektor, tetapi mempunyai juga sumbu sekunder pada arah transversal. Karakteristik seperti ini sangat dipengaruhi oleh bentuk dan orientasi kolom-kolomnya. Kolom segiempat dengan sumbu panjang pada arah balok tersebut akan memperbesar kelinearan ruang, sementara peletakan sumbu panjang pada arah lainnya akan memperkuat sumbu sekunder. Kolom lingkaran adalah bentuk yang netral.

Ruang yang terbentuk pada sistem plat datar [Gambar 13-25(c)] adalah dua arah karena tidak ada sumbu yang dominan. Ruang yang dibentuk pada cara ini relatif bersifat netral. Kolom lingkaran atau bujursangkar tidak akan mengubah sifat dua arah tersebut, sedangkan kolom segiempat dapat menyebabkan salah satu sumbu menjadi dominan. Ruang yang dibentuk dengan balok-dan-*slab* dua arah [Gambar 13-25(d)] bersifat agak netral di mana balok-balok lebih memperkuat sifat dua arah ruang-ruang itu.

Ruang yang dibentuk di bawah permukaan yang sangat besar (misalnya plat datar) tidak mempunyai arah, bagaimana pun yang diberikan oleh sistem tumpuan. Rangka ruang seperti terlihat pada Gambar 13-25(e) adalah contoh ruang yang bersifat demikian (jarak elemen struktur sedemikian kecilnya sehingga permukaan di bawahnya menjadi bidang netral).

Kita dapat membuat variasi atau kombinasi dari bentuk-bentuk umum yang telah disebutkan di atas.



Gambar 13-25 Karakteristik ruang tiga dimensional pada berbagai cara struktural

SOAL

13–1. Kunjungilah empat gedung bertingkat tinggi pada daerah pembaca. Gambarlah sketsa untuk menunjukkan pola tumpuan vertikal pada setiap gedung (pada tingkat terbawah). Tunjukkan pula secara diagramatis apakah elemen tumpuan vertikal tersebut berupa kolom atau dinding pemikul beban. Tunjukkan apakah elemen yang membentang secara horizontal adalah sistem satu arah atau dua arah.

13–2. Untuk gedung-gedung pada Soal 13–1, tunjukkan bagaimana pola tumpuan vertikal dipengaruhi oleh adanya elemen-elemen layan vertikal. Apakah elemen mekanis terkumpul pada daerah-daerah tertentu, misalnya, atau tertanam pada material struktural? Bagaimanakah daerah sirkulasi vertikal yang ada? Ilustrasikan jawaban ini dengan menggunakan diagram.

13–3. Berikan alasan mengapa pola tumpuan vertikal berbentuk bujursangkar dan segiempat lebih banyak digunakan pada banyak gedung dibandingkan dengan pola-pola lain yang mungkin ada (misalnya haksagonal). Kelompokkan jawabannya menurut dua kategori:
(a) Alasan-alasan menurut tinjauan struktural atau konstruksional.
(b) Alasan-alasan menurut tinjauan arsitektural.

13–4. Tunjukkan dua gedung pada daerah pembaca, atau carilah dari literatur, yang pada dasarnya mempunyai pola tumpuan vertikal *berbutir halus*, tetapi juga mempunyai satu atau lebih ruang volume besar. Tunjukkan bagaimana cara struktural digunakan untuk meletakkan ruang besar tersebut (misalnya, apakah dimasukkan atau dipisahkan), juga apakah implikasi struktural yang terjadi. Ilustrasikan jawabannya dengan menggunakan diagram.

Bab 14

MASALAH DALAM DESAIN STRUKTURAL

14.1 PENDAHULUAN

Biasanya kita dapat melakukan satu atau lebih cara struktural umum dengan secara simultan mengatur pola struktural dan fungsional seperti telah dibahas pada Bab 11. Karena beberapa cara umumnya mungkin dilakukan (dengan derajat kecocokan yang berbeda-beda), maka kita perlu lebih lanjut mengembangkan cara-cara tersebut dengan menggunakan kenyataan fisis sedemikian hingga masing-masing cara secara rasional dapat dibandingkan. Pada umumnya, cara yang pertama dilakukan adalah mengembangkan secara rinci, kemudian menganalisisnya untuk mengukur seberapa dekatnya dengan tujuan desain (yaitu tujuan yang dikaitkan dengan masalah desain arsitektural gedung, efisiensi, *serviceability* (kemampuan layan), kemudahan pelaksanaan, biaya, dan sebagainya), untuk kemudian dimodifikasi atau ditolak bergantung pada hasil analisis. Proses ini sering kali diulang beberapa kali hingga menghasilkan alternatif-alternatif yang semakin baik dan semakin dekat dengan tujuan desain. Secara normal, prosedur ini diulang untuk berbagai cara umum sehingga kita dapat membandingkan cara-cara tersebut.

Prosedur umum yang disebutkan di atas tentu saja bukan merupakan proses yang sederhana. Proses itu tidak menjamin bahwa di antara kemungkinan solusi struktural yang mungkin untuk situasi yang diberikan, secara mutlak merupakan yang paling diinginkan dan dipilih. Salah satu tugas dasar perencana adalah memperoleh sebanyak mungkin alternatif yang layak dan menjamin bahwa solusi yang dikehendaki tidak ditentukan begitu saja. Dengan cara serupa,adalah tugas perencana untuk dapat secepat mungkin memilih di antara berbagai alternatif yang memenuhi maksud yang ada.

Langkah pertama yang perlu dilakukan dalam mengembangkan alternatif desain spesifik untuk suatu maksud yang diberikan adalah mendefinisikan secara tepat ruang lingkup, batas-batas dan aturan desain struktur tersebut. Pada proses analisis, hal-hal ini juga harus didefinisikan untuk kemudian dimodelkan. Akan tetapi, dalam konteks desain, langkah ini menjadi lebih rumit karena keputusan-keputusan mengenai bangunan yang mempengaruhi struktur biasanya masih terbuka. Penggunaan solusi tertentu untuk elemen-elemen struktur seperti dinding, misalnya, dapat mempengaruhi desain strukturnya. Apakah dinding itu akan berfungsi sebagai pemisah ruang ataukah juga sebagai pemikul beban, sangat berpengaruh pada solusi strukturalnya. Cara mana yang akan digunakan sangat bergantung pada program gedung yang dimaksud. Cara yang disebut terakhir mungkin cocok untuk rumah, tetapi mungkin tidak cocok untuk gedung perkantoran. Sebaliknya, dinding yang hanya berfungsi sebagai pemisah ruangan biasanya cocok untuk gedung perkantoran, dan tidak cocok untuk rumah. Jadi, kita harus memperhatikan keterangan yang rinci tentang persyaratan program gedung.

Apabila keterangan dasar mengenai gedung telah ada, masih banyak faktor yang harus ditinjau dalam menentukan sistem struktural pada saat pendetailan. Beberapa di antaranya sudah cukup jelas. Misalnya penentuan panjang bentang, yang dapat menentukan, karena tidak semua pilihan sistem struktur dapat memberikan bentang yang sama secara efisien. Pengaruh bentang terhadap pilihan struktur akan dibahas berikut ini. Panjang bentang bukanlah satu-satunya hal yang menentukan respons struktur seperti yang sering diasumsikan. Besar dan sifat beban yang bekerja pada struktur juga sangat menentukan. Dengan demikian, pada konteks desain, bagaimana suatu desain struktur akan menahan beban lateral dan beban vertikal yang bekerja padanya, mungkin akan merupakan hal yang terpenting. Hal ini akan dibahas secara rinci pada Bab 14.3.

Apabila respons struktural tertentu telah dipilih (sementara) untuk suatu klasifikasi yang diberikan, maka langkah berikutnya adalah mencari implikasinya pada detail (dengan mengikuti petunjuk pada Bab 13, tetapi dengan cara yang tidak begitu abstrak), dan membuat detail tersebut sedemikian rupa sehingga implikasi penggunaannya dapat dimengerti. Langkah terakhir ini dibahas lebih rinci pada Bab 15.

14.2 BEBAN VERTIKAL: EFEK TERHADAP DESAIN STRUKTUR

14.2.1 Jenis Beban

Bagaimana suatu beban terdistribusi atau terpusat merupakan faktor yang menentukan dalam memilih sistem struktural untuk suatu kondisi yang diberikan. Ada sejumlah sistem struktural yang khususnya cocok untuk memikul beban lantai atau atap ringan terdistribusi merata. Struktur ini umumnya bersifat membentuk ruang *(surface forming)* dan biasanya terdiri atas sederetan elemen sama yang berjarak dekat, atau menggunakan komponen-komponen yang dapat diproduksi secara

massal. Yang termasuk ke dalam sistem struktur demikian adalah sistem *joist* kay... sistem dek baja, papan beton pracetak berbentang panjang, *joist* baja *web* terbuka, dan plat datar beton bertulang.

Apabila ada lantai yang dibebani terdistribusi merata, maka usaha yang dilakukan biasanya adalah membuat agar beban dapat benar-benar dipikul dulu oleh elemen-elemen permukaan secara efisien. Dengan demikian, jarak antara elemen struktur yang memikul elemen permukaan ini sering kali ditentukan oleh panjang bentang yang paling efisien untuk elemen permukaannya, bukan oleh faktor-faktor lain. Ukuran dan jarak elemen struktur bersayap lebar yang memikul dek lantai baja, misalnya, sering kali ditentukan oleh optimisasi dek yang digunakan. Jadi, proses desain yang dilakukan biasanya dimulai dengan mencari elemen struktur terkecil dan teringan (tetapi lebih banyak) sebagai pemikul beban, dan selanjutnya mendesain balok pemikulnya, baru kemudian kolom, bukan urutan sebaliknya.

Elemen-elemen pembentuk-ruang umumnya tidak cocok digunakan apabila ada beban besar yang terpusat. Pada banyak hal, elemen struktur yang memikul beban terpusat besar harus secara khusus dirancang untuk situasi yang ada. Elemen-elemen ini umumnya berupa elemen yang membentang satu arah. Beberapa di antaranya adalah rangka batang baja atau kayu yang mempunyai konfigurasi batang tertentu, *girder* plat, dan balok beton bertulang pratarik. Pada umumnya elemen struktur ini tidak diproduksi secara massal. Pada desain elemen struktur tersebut, distribusi gaya yang terjadi padanya sangat penting diperhatikan.

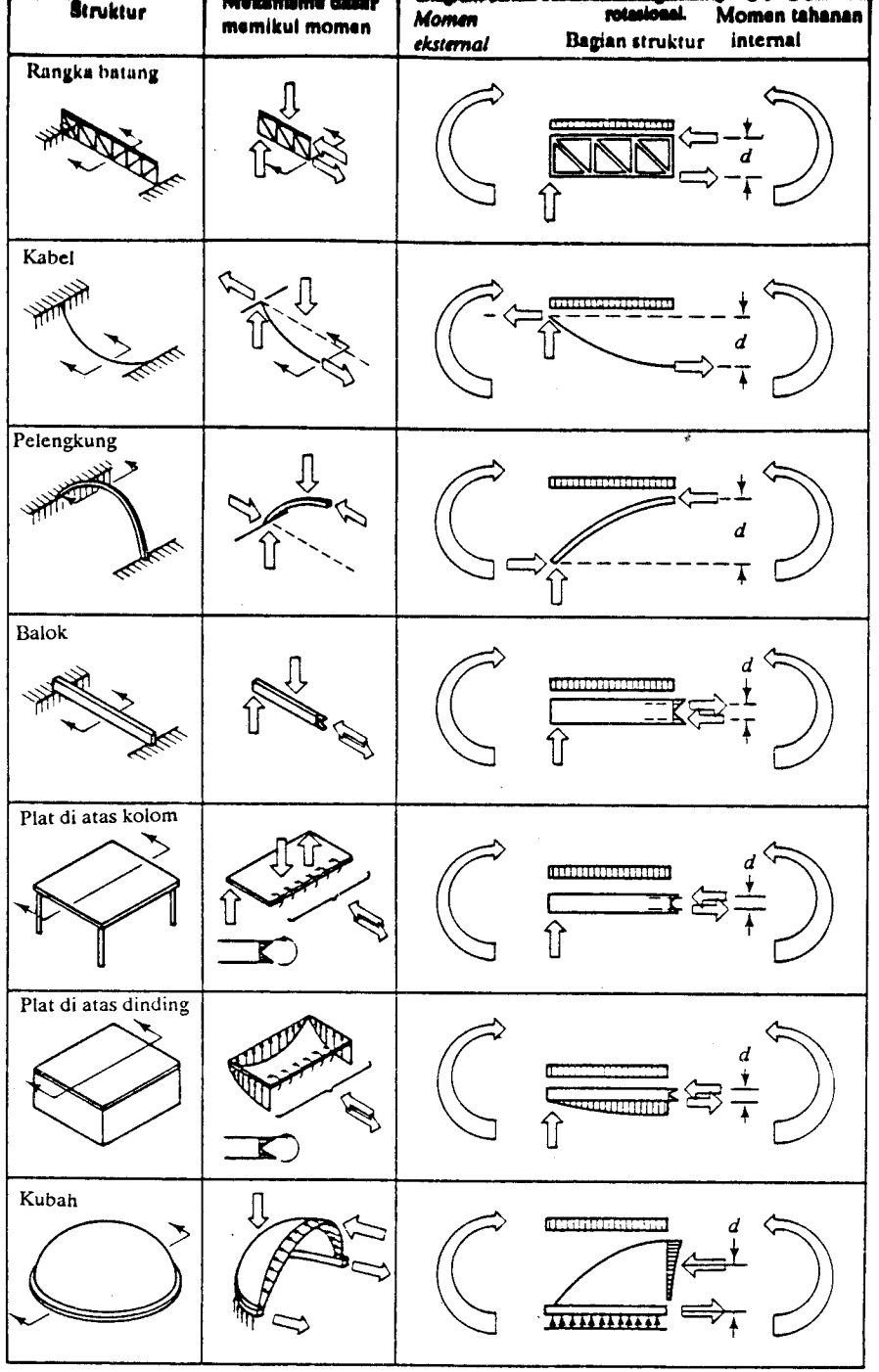
14.2.2 Panjang Bentang

Prinsip-prinsip Dasar. Panjang bentang selalu merupakan salah satu penentu dalam memilih respons struktur untuk suatu situasi tertentu. Ada sistem struktural yang cocok untuk selang bentang tertentu, dan tidak cocok untuk lainnya.

Perlunya bentang struktural akan jelas apabila kita mengingat bahwa momen desain untuk suatu beban yang terdistribusi merata sebanding dengan kuadrat panjang bentang. Mengali panjang bentang dengan dua, misalnya, akan memperbesar momen sebesar empat kalinya. Tentu saja ukuran elemen struktur yang bersangkutan sangat bergantung pada momen desain yang ada. Pendekatan untuk suatu pilihan sistem struktural juga bergantung pada faktor ini. Karena alasan itulah kita perlu mempelajari dengan baik bagaimana pilihan-pilihan sistem struktur memberikan momen tahanan internal untuk mengimbangi momen eksternal yang ada.

Gambar 14–1 mengilustraskan bagaimana berbagai sistem struktural memberikan momen tahanan internal untuk mengimbangi momen eksternal. Perhatikan bahwa pada semua kasus, mekanisme dasarnya sama. Suatu kopel akan terbentuk antara daerah tarik dan tekan, yang besarnya sama dengan momen eksternal yang bekerja. Untuk suatu momen yang diberikan, besar gaya atau tegangan internal yang timbul pada daerah tarik maupun tekan bergantung langsung pada besar momen yang timbul. Semakin tinggi struktur tersebut, akan semakin besar lengan momennya, dan semakin kecil tegangan atau gaya tarik maupun tekan yang timbul.

Proses desain yang cocok untuk suatu interval (selang) bentang menggunakan prinsip-prinsip yang disebutkan di atas. Kepekaan momen desain terhadap bentang adalah hal kritis. Untuk bentang kecil, momen desain yang terjadi kecil, semua

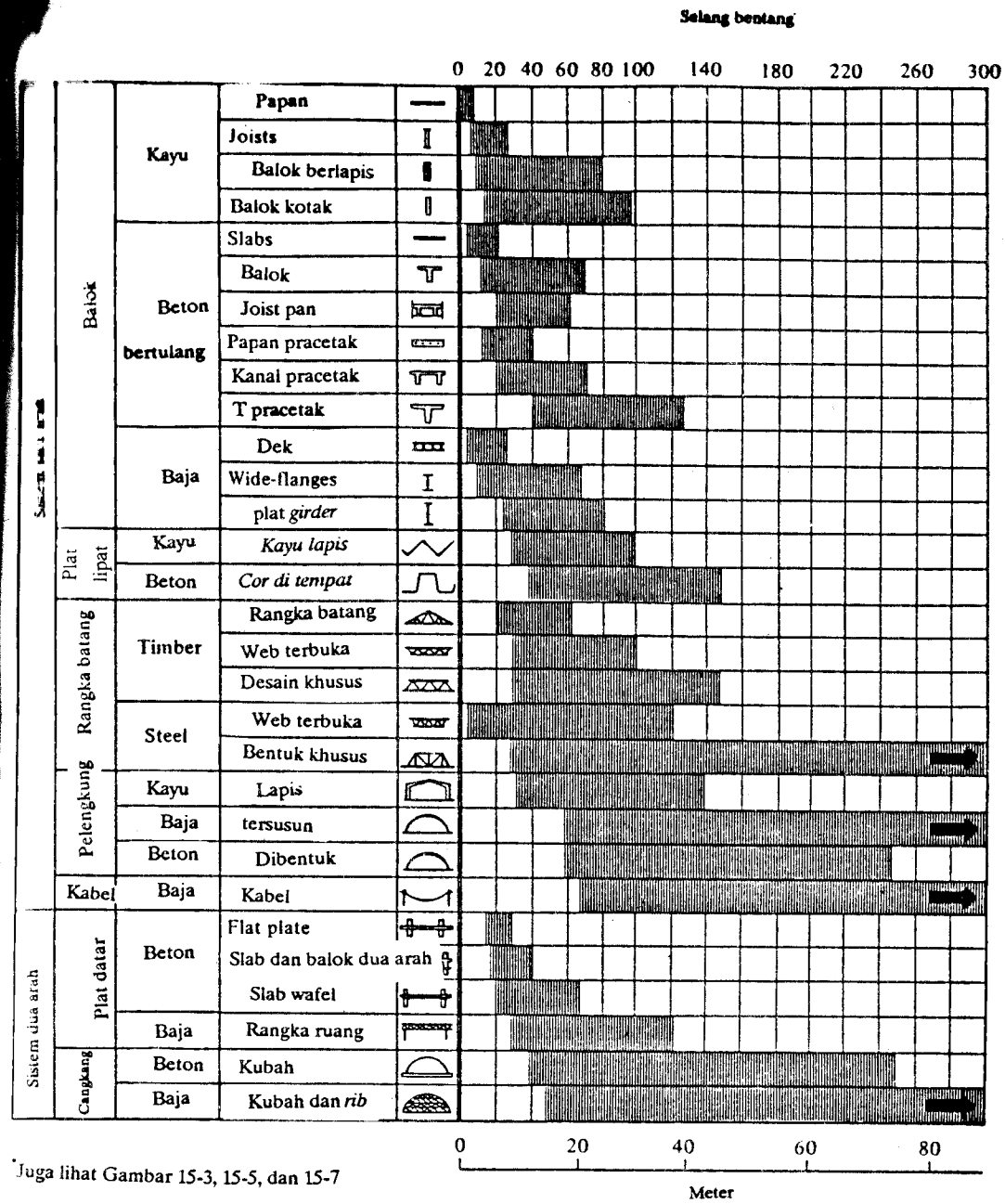


Gambar 14-1 Mekanisme pemikul momen dasar pada berbagai jenis struktur. Pada semua kasus, strukturnya memberikan kopel gaya internal yang membentuk momen tahanan internal dan mengimbangi momen eksternal pada penampang yang bersangkutan. Apabila lengan momen internal semakin besar, maka gaya internalnya mengecil, begitu pula sebaliknya.

pilihan struktur pada Gambar 141 mungkin digunakan. Akan tetapi bentangannya semakin besar, momen desainnya akan cepat membesar, hingga di antara pilihan pada Gambar 14-1 dapat menjadi kurang layak. Elemen struktur bertinggi konstan, seperti balok misalnya, pada umumnya berukuran relatif kecil sehingga penambahan panjang bentang akan diikuti dengan bertambah besarnya tegangan dan gaya tarik serta tekan yang membentuk kopel. Karena tinggi elemen struktur itu terbatas, maka penambahan ukuran bentang tidak selalu dapat diimbangi dengan menambah lengan momen maupun dengan cara lain (misalnya memperbesar luas flens). Dengan demikian elemen struktur itu tidak cocok untuk bentang yang sangat besar. Kontrol defleksi juga mungkin merupakan faktor yang menentukan. Tentu saja, apabila tinggi struktural *selalu* diperbesar untuk memikul momen desain yang diakibatkan oleh bentang yang semakin besar, maka internalnya dapat dibuat tetap konstan. Hal inilah yang terjadi pada pembentukan rangka batang, kabel, maupun pelengkung. Struktur ini pada umumnya relatif ringan sehingga selalu memberkan lengan momen internal yang sangat besar. Dengan demikian, gaya-gaya yang membentuk kopel tahanan dapat dibuat relatif kecil dan strukturnya akan masih dapat memberikan momen tahanan sangat besar. Jadi struktur tersebut dapat digunakan untuk bentang besar.

Hubungan yang Umum antara Bentang dan Jenis Struktural. Gambar 14-2 memperlihatkan ilustrasikan interval (selang) bentang pendekatan untuk berbagai sistem yang memikul bentang secara horizontal yang cocok untuk lantai maupun atap. Bentang *maksimum* yang ditunjukkan pada gambar tersebut bukan menunjukkan bentang maksimum *yang mungkin* (karena kebanyakan sistem pada gambar tersebut dapat saja mempunyai bentang yang lebih besar daripada yang tercantum pada gambar tersebut), melainkan ukuran bentang yang masih dipandang wajar meskipun ukuran ini lebih besar daripada yang umum dijumpai. Pembatasan minimum dimaksudkan untuk menunjukkan batas terkecil yang layak berdasarkan tinjauan ekonomis maupun tinjauan konstruksi. Tentu saja tidak ada angka yang pasti mengenai batas-batas tersebut. Diagram mengenai selang bentang yang lebih rinci untuk beberapa jenis material dapat dilihat pada Bab 15.

Struktur Berbentang Panjang. Pemilihan struktur yang cocok untuk digunakan pada konteks tertentu sering kali akan lebih mudah apabila persyaratan struktural, khususnya bentangnya, sangat besar. Sebagaimana telah disebutkan di atas, karakteristik sistem-sistem berbentang besar yang layak adalah yang tinggi strukturalnya relatif besar dibandingkan dengan bentangnya. Karakteristik yang berkaitan dengan hal ini adalah bahwa struktur tersebut biasanya mempunyai banyak bentuk. Dengan demikian, sistem struktural yang cocok untuk bentang panjang umumnya dapat berupa rangka batang bertinggi tidak konstan, pelengkung, kabel, jaring, pneumatik, dan cangkang. Tentu saja kadang kala ada kekecualian. Ada banyak contoh, misalnya struktur rangka batang bertinggi konstan dan berbentang panjang, rangka ruang, dan struktur-struktur lainnya. Jarang di antara sistem struktur ini yang tingkat efisiensinya menyamai rangka batang bertinggi tidak konstan, pelengkung, maupun kabel. Hal yang menarik dari sini adalah aksi struktural internal pada struktur-



*Juga lihat Gambar 15-3, 15-5, dan 15-7

Gambar 14-2 Selang (interval) bentang untuk berbagai sistem struktur

struktur yang disebut terakhir tidak lebih rumit daripada yang diberikan oleh elemen struktur lain, misalnya balok, yang tidak mempunyai kemampuan berbentang panjang.

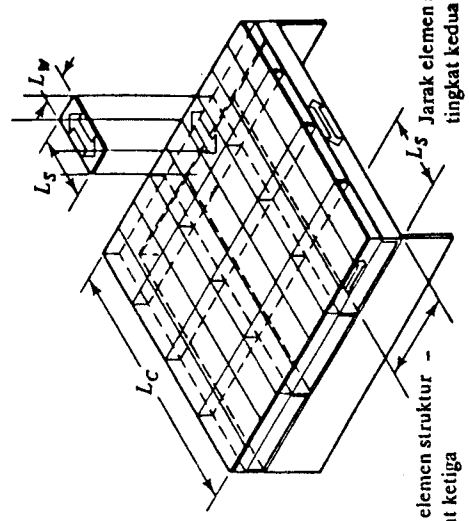
Sebagai akibat dari geometri struktur yang bertinggi tidak konstan *(shaped structures)* adalah struktur ini menjadi sangat berguna untuk dipakai pada atap gedung atau pada situasi lain yang bentuk strukturalnya dapat bervariasi (bertinggi tidak konstan). Jarang di antara sistem-sistem ini yang dapat dipakai sebagai permukaan planar.

Sistem Berbentang Panjang dan Menengah. Apabila persyaratan bentang ataupun beban yang dipikul berkurang pada suatu gedung, dan apabila strukturnya harus memberikan permukaan planar yang kaku, maka pemilihan struktur akan menjadi lebih sulit karena semakin banyak sistem yang mungkin digunakan pada selang bentang panjang ataupun menengah. Ada berbagai sistem yang terbuat dari bermacam material yang dapat digunakan.

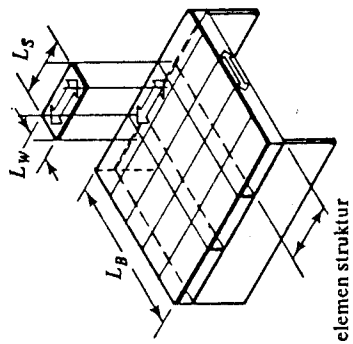
Pada bentang-bentang yang umum dijumpai pada gedung, jelas dari Gambar 14–2 bahwa ada sejumlah sistem yang cocok digunakan. Untuk bentang sekitar 16 ft sampai 20 ft (5 m sampai 6 m), misalnya, baik sistem satu maupun dua arah dapat digunakan. Mana yang paling cocok biasanya tidak dapat ditentukan dengan mudah tanpa analisis khusus yang meninjau alternatif-alternatif desain untuk kondisi bentang dan beban tertentu, dan membuat analisis biaya. Biasanya, yang semakin ringan atau semakin sedikit jenis konstruksi yang digunakan adalah yang diinginkan. Sebagai contoh, pada beton bertulang, untuk bentang 20 ft (6 m) dan untuk beban terdistribusi merata ringan, yang paling dikehendaki di antara sistem beton dua arah adalah plat datar. Sistem beton bertulang lainnya (misalnya *slab wafel)* dapat saja digunakan, tetapi sistem ini lebih membutuhkan ruang, lebih mempunyai kapasitas memikul beban, dan lebih mempunyai kemampuan berbentang besar daripada yang dibutuhkan. Dari tinjauan struktural, tidak ada untungnya membuat konstruksi sistem yang lebih kompleks apabila sistem plat datar saja sudah mampu memenuhi kebutuhan yang ada. Akan tetapi, perlu diingat bahwa apabila bentangnya semakin besar, plat datar akan menjadi tidak mampu memikul beban yang ada, dan pada saat itulah sistem ini tidak cocok lagi untuk digunakan.

Pada keadaan bentang pendek, struktur yang semakin tinggi dan dibentuk (tingginya tidak konstan) yang sebenarnya mampu digunakan pada bentang panjang secara struktural dapat saja digunakan, tetapi jarang dilakukan karena masalah konstruksi (membutuhkan banyak biaya). Sistem kabel juga dapat digunakan untuk bentang 15 ft (5 m), misalnya, tatapi penggunaan sistem ini tidak cocok apabila sistem dengan *joist* kayu sederhana sudah dapat digunakan.

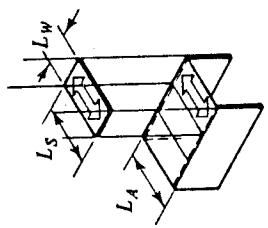
Kemudahan struktur rangka batang – dalam hal mudahnya diberi bentuk struktur dan dibuat – menjadikan struktur ini sangat berguna untuk berbagai ukuran bentang, mulai dari bentang pendek, menengah, sampai panjang. Karakteristik dan geometri khusus pada rangka batang masing-masing bentang tentu saja ada. Rangka batang berbentang pendek dan menengah pada umumnya digunakan secara berulang dan diletakkan berdekatan – sebagaimana yang dilakukan pada sistem *joist.*



(c) Sistem tiga tingkat apabila bentangnya semakin besar, kita perlu menggunakan sistem tiga tingkat. Dalam hal ini, elemen permukaan ditumpu pada bentang ekonomis pada bentang ekonomis maksimumnya oleh elemen-elemen tingkat kedua. Elemen-elemen ini selanjutnya ditumpu oleh elemen tingkat ketiga yang lebih sedikit dan lebih besar. Jarak antara elemen tingkat ketiga ditentukan berdasarkan bentang yang paling ekonomis untuk elemen tingkat kedua. Pada umumnya perlu dilakukan optimisasi pada desain elemen kedua dan ketiga.



(b) Sistem dua tingkat: apabila panjang bentang semakin besar hingga lebih besar dari jangkauan panjang bentang elemen permukaan, diperlukan elemen-elemen tingkat kedua yang memikul elemen satu arah itu. Elemen-elemen ini biasanya diletakkan pada bentang ekonomis optimum untuk elemen permukaannya, dan kemudian didesain secara khusus untuk memikul beban yang bekerja. Cara lainnya adalah menggunakan elemen tingkat kedua yang *off-the- shelf* yang diletakkan pada jarak yang memberikan kapasitas memikul beban paling efi-sien. Selanjutnya digunakan elemen permukaan yang paling cocok untuk jarak tersebut.



(a) Sistem satu tingkat: untuk bentang pendek, elemen permukaan dapat digunakan secara langsung.

Gambar 14-3 Struktur-struktur planar yang dibentuk dari elemen- elemen permukaan kaku satu arah berbentang pendek (misalnya dek, papan, plat pracetak) dan elemen garis kaku satu arah (misalnya balok atau rangka batang). Sistem berbentang panjang khusus, tentu saja, dapat digunakan, tetapi tidak memerlukan banyak tingkat seperti ini. Mana yang lebih efisien hanya dapat ditentukan setelah dilakukan analisis rinci.

Elemen-elemen ini sering kali diproduksi secara massal. Rangka batang berbentang panjang pada umumnya dibuat secara khusus dan satu sama lain berjarak berjauhan.

Sistem Satu dan Dua Arah. Pada selang bentang pendek [yaitu 15 sampai 35 ft (4,5 m sampai 10,6 m)] sistem dua arah maupun satu arah dapat digunakan. Akan tetapi, untuk ukuran bentang di atas suatu titik batas sekitar 50 sampai 60 ft (15 sampai 18 m), sistem beton bertulang datar dua arah biasanya sudah tidak cocok lagi digunakan ditinjau dari segi konstruksi meskipun masih mungkin dilaksanakan, dan elemen-elemen yang membentang satu arah umumnya lebih cocok digunakan. Untuk sistem atap yang memikul beban ringan terdistribusi, *joist* baja *web* terbuka berjarak dekat pada umumnya efisien untuk selang bentang tersebut. Elemen struktur beton bertulang pratekan dan pracetak juga banyak digunakan.

Semakin besar bentang struktur, sekitar 80 ft sampai 100 ft (24 sampai 30 m), sistem yang lebih cocok digunakan adalah elemen satu arah. Baja sering digunakan, begitu pula beton bertulang pratekan. Di antara sistem datar dua arah, rangka ruang baja dapat mempunyai ukuran bentang itu. Sistem duaarah yang didesain secara khusus, misalnya secara grid, tentu saja dapat digunakan. Akan tetapi, sistem demikian biasanya menjadi mahal.

Sistem-sistem Secara Hierarkis. Sebagai akibat dari semakin besarnya bentang sistem struktural satu arah adalah bahwa adanya elemen-elemen bertinggi konstan dan mempunyai hierarki, dan hal ini berarti semakin banyaknya tingkat (lihat Gambar 14–3). Struktur berbentang pendek umumnya menggunakan susunan satu tingkat, sementara yang berbentang lebih panjang menggunakan susunan dua atau tiga tingkat. Tingkat yang semakin tinggi mungkin digunakan, tetapi jarang. Prinsip ini tentu saja tidak dapat diterapkan secara umum karena ada elemen-elemen khusus (seperti beton prategang berbentuk T) yang cukup efisien untuk digunakan pada bentang panjang secara langsung. Prinsip tersebut lebih cocok diterapkan pada sistem yang menggunakan elemen pembentuk ruang sebagai elemen pertama pemikul beban (misalnya dek baja atau papan-papan). Sebagai akibat penggunaan prinsip tersebut (lihat Bab 14.2.1), sistem yang dihasilkan akan berupa sistem banyak-lapisan (lihat Gambar 14–3). Sistem yang berlapis ini dapat dibuktikan merupakan sistem yang memberikan volume minimum; karena itulah sistem ini sering digunakan.

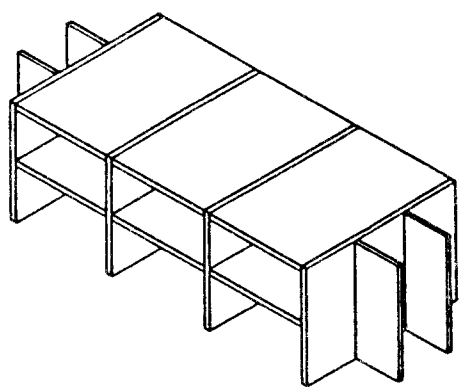
14.3 BEBAN LATERAL: EFEK PADA DESAIN STRUKTUR

14.3.1 Tinjauan Desain Dasar

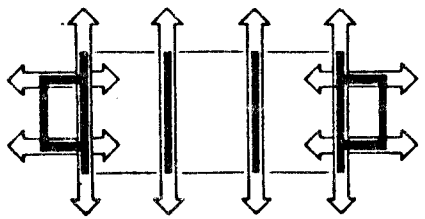
Pada desain sistem struktural, ketidakstabilan lateral merupakan hal mendasar yang amat penting untuk dihindari. Hal ini sangat penting diperhatikan untuk gedung dengan tinggi berpa pun, tetapi lebih penting lagi pada gedung bertingkat tinggi. Bagaimana suatu struktur menahan gaya lateral tidak saja mempengaruhi desain elemen-elemen vertikal struktur, tetapi juga elemen-elemen horizontalnya.

Mekanisme dasar untuk menjamin adanya kestabilan lateral (dinding geser, bracing diagonal, dan aksi rangka) dapat diperoleh dengan menggunakan hubungan kaku sebagaimana telah disebutkan pada bab-bab terdahulu. Semua mekanisme ini berlaku untuk memperoleh bidang geser kaku yang dapat memikul beban lateral. Pada struktur bertingkat rendah sampai menengah, penggunaan salah satu dari mekanisme tersebut dapat memberikan tahanan lateral yang cukup. Bagaimana pun, jelaslah bahwa diperlukan sejumlah bidang geser agar kestabilan lateral terjamin. Pada banyak jenis gedung hal ini dapat dilakukan dengan mudah. Pada rumah, misalnya, perilaku *cellular* padanya menyebabkan harusnya digunakan dinding geser atau elemen *bracing* pada bidang temu antara masing-masing unit. Rangka juga dapat digunakan pada lokasi ini; tetapi, sebagaimana telah disebutkan pada Bab 9, penggunaan rangka-rangka dapat kurang efisien sebagai pemikul beban lateral dibandingkan dengan *bracing* diagonal. Pada rumah, penggunaan dinding atau *bracing* diagonal pada bidang temu antara masing-masing unit tidak menyebabkan masalah fungsional sehingga hal ini lebih sering dilakukan. Pada jenis-jenis struktur lainnya, penghalang yang disebabkan oleh dinding geser atau sistem *bracing* diagonal dapat menyebabkan terjadinya masalah fungsional sehingga tidak dapat digunakan secara bebas. Untuk itu digunakan rangka atau kombinasi rangka dengan dinding geser atau *bracing* diagonal. Gedung-gedung bertingkat menengah dan tinggi, misalnya, sering kali mempunyai rangka dasar yang diperkaku dengan dinding geser atau *bracing* diagonal pada tepi gedung atau di sekitar daerah servis. Biasanya elemen struktur pengaku ini diletakkan pada lokasi yang tidak menimbulkan masalah fungsional.

Pada gedung-gedung berdenah segiempat, masalah terbesar yang diakibatkan oleh beban lateral adalah pada arah pendeknya meskipun stabilitas harus sudah dijamin pada kedua arah (lihat Gambar 14–4). Kadang kala satu jenis mekanisme pemikul beban lateral digunakan pada satu arah, begitu pula pada arah lainnya.

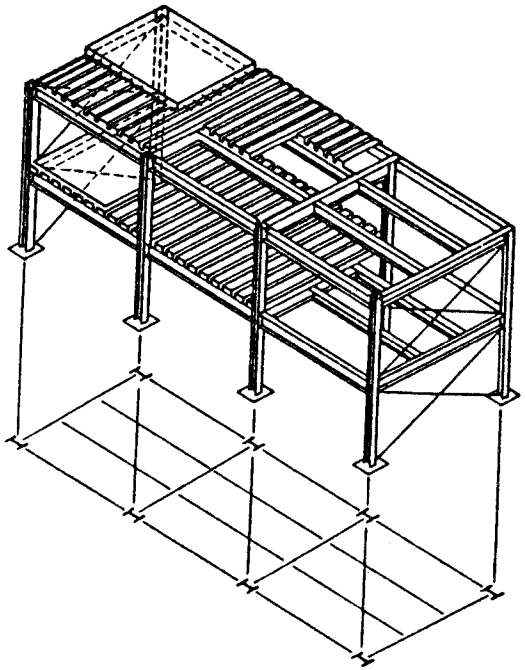


(a) Struktur dasar

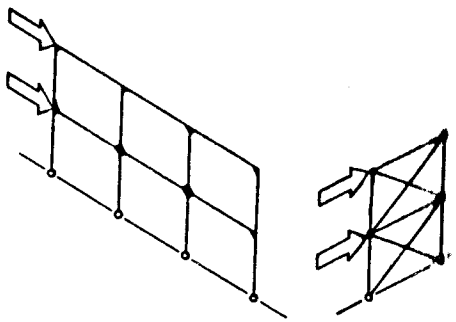


(b) Apabila dinding digunakan untuk memberikan kestabilan lateral pada gedung, dinding dibuat mengikuti dimensi terpendek pada gedung. Kestabilan pada arah memanjang umumnya dapat diberikan oleh dinding-dinding transversal (*core* tangga dan sebagainya).

Gambar 14-4 Penyusunan bidang-bidang geser dan atau dinding penumpu pada struktur bertingkat rendah sampai menengah



(a) Struktur dasar



(b) Mekanisme pemikul beban lateral: pada arah pendek, sistem *bracing* (pengekang) digunakan dan beban lateral dipikul oleh aksi rangka batang. Pada arah panjang, beban lateral dipikul oleh aksi rangka. Beban-beban pada arah pendek umumnya merupakan yang paling kritis, dan mekanisme pemikul beban lateral yang paling efisien adalah yang ada pada arah ini.

GAMBAR 14–5 Mekanisme tahanan beban-lateral yang mungkin pada struktur baja sederhana.

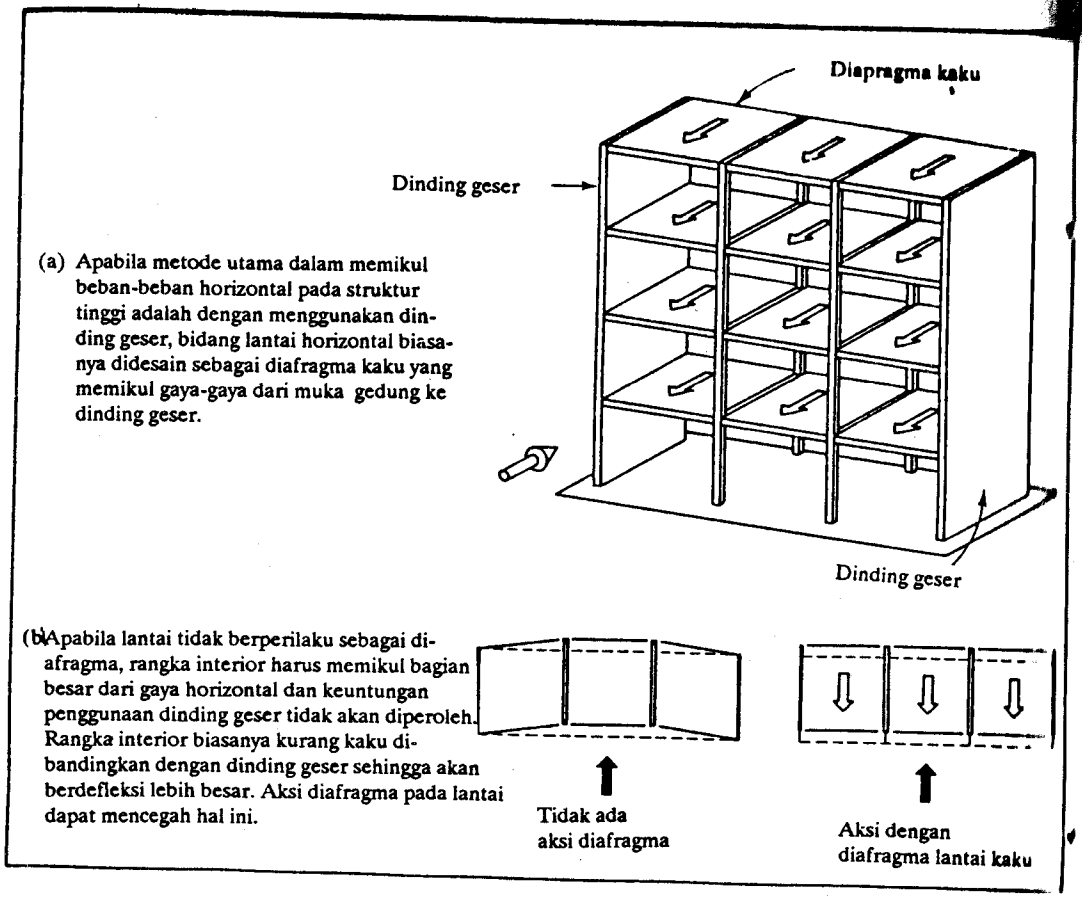
Pada gedung baja sederhana, misalnya, mekanisme yang lebih efisien (misalnya dinding geser atau *bracing* diagonal) digunakan pada arah yang lebih pendek. Kestabilan pada arah memanjang diperoleh baik dengan elemen struktur yang sama dengan arah memendek maupun dengan aksi rangka (lihat Gambar 14–5). Pada gedung baja cara ini memperjelas bagaimana elemen-elemen struktur itu disusun. Pada gedung-gedung yang relatif rendah, elemen bersayap lebar biasanya digunakan sedemikian rupa sehingga terhadap sumbu kuatnya akan berfungsi sebagai bagian dari rangka pada arah memanjang, dan terhadap sumbu lemahnya akan berfungsi sebagai bagian dari sistem *bracing* diagonal dalam arah pendek. Karena *bracing* diagonal berperilaku seperti rangka batang, maka momen lentur pada elemen struktur dalam arah pendek akan minimum sehingga meletakkan sumbu lemah pada arah ini tepat. Pada arah memanjang, beban lateral dipikul oleh aksi rangka sehingga pada elemen struktur arah ini terjadi momen lentur yang relatif besar. Dengan demikian, penggunaan sumbu kuat elemen struktur pada arah ini tepat.

Apabila dimensi pendek gedung baja sangat kecil dibandingkan dengan tinggi gedung (menunjukkan adanya masalah besar pada beban lateral dalam arah pendek) dan gedung itu sudah secara cukup dikekang pada arah memanjang, maka gabungan antara rangka dan sistem *bracing* diagonal dapat digunakan untuk memikul beban-beban pada arah memendek. Dalam hal ini, elemen struktur bersayap lebar disusun sedemikian rupa sehingga sumbu kuatnya mempunyai kontribusi terhadap aksi rangka dalam arah pendek. Rangka yang dilengkapi diagonal ini membentuk sistem yang mempunyai kapasitas besar dalam memikul beban.

Prinsip-prinsip yang dijelaskan di atas (meletakkan sumbu lemah dan kuat) juga berlaku bagi kolom-kolom pada struktur beton bertulang. Elemen-elemen yang lebih kaku (misalnya dinding geser) diletakkan pada arah pendek gedung.

Apabila bidang geser akan secara efektif digunakan bersama bidang-bidang vertikal lainnya yang tidak mempunyai kemampuan besar dalam memikul beban lateral, seperti misalnya sistem kolom dan balok baja yang berhubungan sendi, maka bidang-bidang lantai harus didesain untuk berlaku sebagai diafragma horizontal kaku, yang berlaku sebagai balok horizontal tipis yang membentang di antara bidang-bidang geser (Gambar 14–6). Aksi diafragma ini berfungsi meneruskan gaya lateral dari bidang vertikal tak-memikul-beban interior ke bidang geser pemikul beban. Apabila sistem beton bertulang digunakan, maka pemakaian lantai-lantai yang berfungsi sebagai diafragma kaku pada umumnya tidak menimbulkan masalah. Pada baja kita perlu berhati-hati dalam menjamin adanya aksi diafragma. Bergantung pada jarak antara bidang-bidang geser, kita perlu juga meningkatkan kapasitas pikul beban lateral pada bidang-bidang vertikal interior.

Apabila suatu struktur akan diperkaku secara khusus dengan menggunakan sistem dinding geser atau *bracing* diagonal, kita perlu hati-hati dalam meletakkan elemen ini secara simetris. Apabila hal ini tidak dilakukan, dapat terjadi efek *torsional* yang tidak diinginkan (lihat Gambar 14–7) yang diakibatkan oleh tidak berimpitnya pusat kekakuan gedung dengan pusat beban lateral. Meletakkan elemen-elemen tersebut secara simetris merupakan hal yang khususnya penting pada gedung bertingkat tinggi atau apabila beban gempa cukup besar. Struktur dapat dirancang untuk menahan efek torsional, tetapi untuk itu tentu saja diperlukan biaya tambahan.

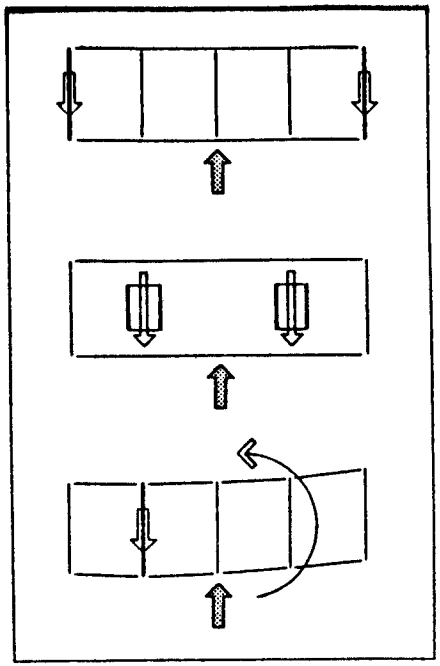


GAMBAR 14–6 Penggunaan diafragma lantai kaku pada gedung rangka yang menggunakan dinding geser untuk memikul beban horisontal.

14.3.2 Pengaruh pada Desain Elemen Struktur dan Hubungan

Yang menarik di sini adalah bahwa penggunaan satu atau lebih mekanisme pemikul beban lateral sebagaimana disebutkan di atas mempengaruhi desain dan atau pemilihan setiap elemen struktur berikut hubungannya. Gambar 14–8 mengilustrasikan beberapa implikasi dasar.

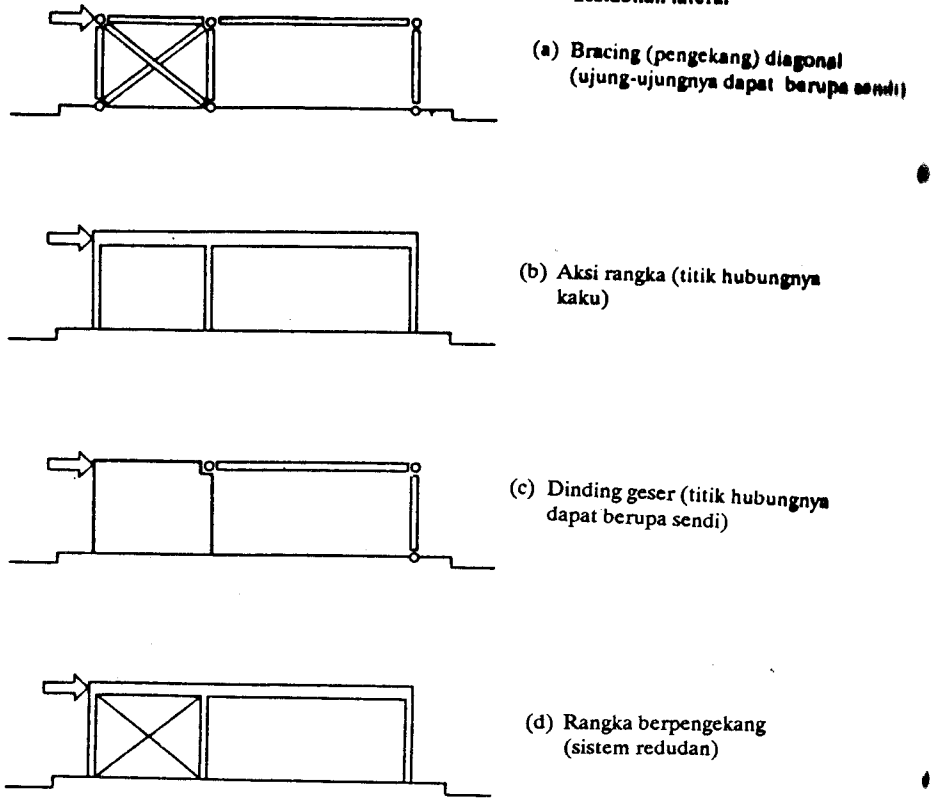
Apabila aksi rangka saja telah dapat menjamin kestabilan, maka sistem dengan menggunakan hubungan kaku dapat langsung digunakan. Apabila bidang-bidang geser atau *bracing* diagonal digunakan, maka persyaratan kekakuan titik hubung tidak menentukan. Dengan demikian, hal-hal ini menyangkut desain dan pemilihan setiap elemen balok dan kolom. Tidak semua sistem yang ada dapat langsung memberikan hubungan yang mampu menahan momen, sementara pada sistem-sistem lainnya kekakuan titik hubung dapat dengan mudah diperoleh.



Gambar 14-7 Penggunaan bidang geser pada struktur bertingkat tinggi dan efek penempatan tidak simetris. Apabila bidang geser (dinding atau *bracing* diagonal) digunakan untuk memikul beban horizontal pada struktur tinggi, bidang-bidang tersebut harus disusun secara simetris untuk menghindari efek torsional.

Dalam memilih sistem, kita perlu membuat kecocokan antara perilaku masing-masing elemen struktural dengan kondisi ujungnya. Elemen beton pracetak, misalnya, secara alami cocok untuk situasi di mana kekakuan titik hubung tidak diperlukan (jadi hal ini mengharuskan digunakannya bidang-bidang geser atau *bracing* diagonal pada gedung). Memang benar kita dapat membuat hubungan kaku pada balok beton pracetak, tetapi hal ini sulit dilakukan. Sebaliknya, apabila aksi rangka saja diasumsikan dapat menjamin kestabilan seluruh gedung, maka sistem beton bertulang yang dicor di tempat akan cocok digunakan karena kekakuan titik hubung dapat diperoleh dengan mudah. Pada struktur ini hubungan sendi sulit dilakukan. Pada sistem baja kedua hal tersebut dapat dilakukan. Hubungan pada elemen struktur kayu secara alami berbentuk sendi (titik hubung kaku sulit diperoleh).

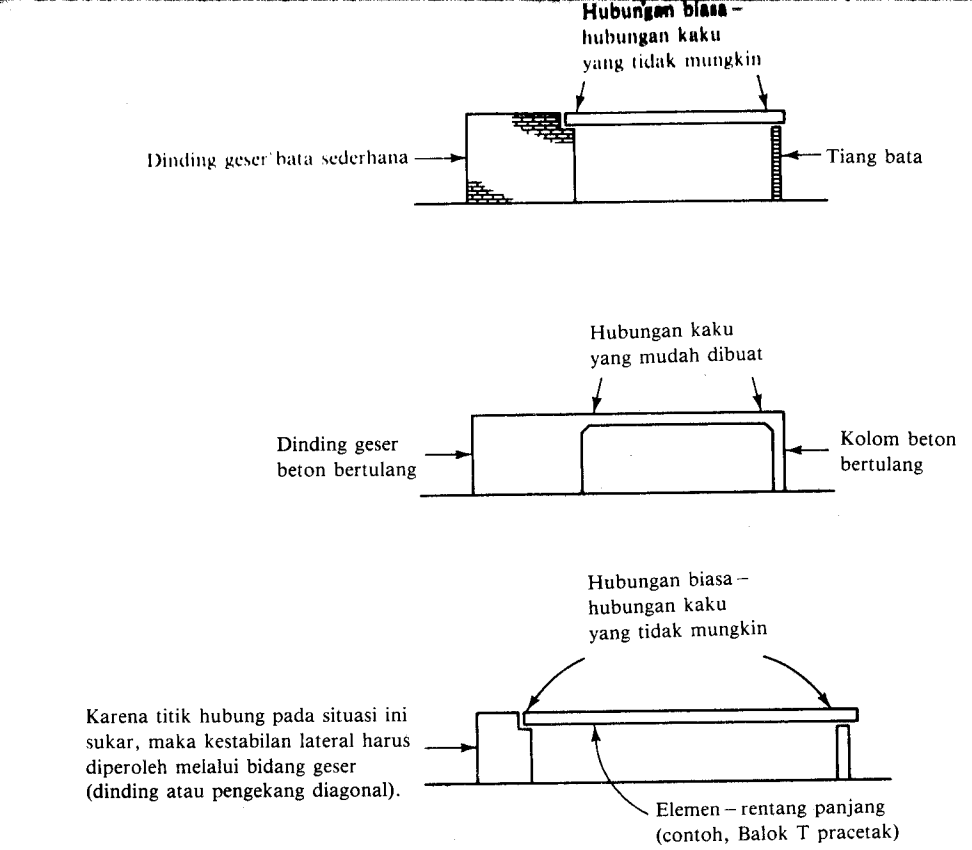
Pemilihan metode pemikul stabilitas tidak selalu lebih penting daripada pemilihan sistem yang membentang secara horizontal. Dalam hal bentang horizontal sangat panjang atau beban-bebannya unik, perilaku elemen horizontal dapat menentukan jenis pemikul beban lateral yang digunakan. Apabila bentangnya sekitar 100 ft (33 m), misalnya, dan balok T pracetak merupakan yang paling cocok untuk memikul beban vertikal, kestabilan lateral yang diperoleh melalui teknik selain kekakuan titik hubung menjadi keharusan karena jenis dan skala elemen horizontal,



Gambar 14-8 Metode-metode umum dalam menahan beban lateral: implikasi terhadap jenis hubungan

dan kesulitan mendapat hubungan kaku, menyebabkan penggunaan aksi rangka tidak layak lagi. Secara umum, semakin panjang bentang horizontal, aksi rangka menjadi kurang layak digunakan untuk memperoleh kestabilan lateral (Gambar 14–9).

Sering kali karakteristik yang dimiliki suatu elemen struktural mempengaruhi pemilihan elemen lainnya. Apabila dinding bata pemikul beban digunakan pada gedung bertingkat rendah, dinding akan berfungsi sebagai dinding geser dalam menahan gaya arah lateral. Tentu saja akan lebih baik kalau kita membuatnya terbentang pada dimensi pendek gedung. Kestabilan lateral di sepanjang dimensi panjang dapat diperoleh (bergantung pada tinggi gedung) melalui *core* tangga yang dirancang secara khusus atau dinding-dinding interior yang terletak melintang terhadap dinding pemikul. Penggunaan dinding bata mengandung arti bahwa elemen-elemen yang membentang horizontal harus ditumpu sederhana karena dinding bata tidak dapat memikul momen (kecuali apabila diperkuat secara khusus). Dengan



Gambar 14-9 Implikasi-implikasi khas dari jenis konstruksi pada pilihan titik hubung

demikian, penggunaan hubungan kaku pada ujung-ujung elemen (yang dimaksudkan untuk memberikan momen pada dinding) tidak ada artinya.

Deskripsi sistem-sistem yang disebutkan dalam bab sesudah ini perlu diperhatikan benar, khususnya mengenai kondisi titik hubung. Diskusi pada Bab 3.3.2 juga perlu diperhatikan.

14.3.3 Konstruksi Bertingkat Banyak

Desain Kekuatan. Berdasarkan tinjauan dessain struktural, apabila suatu gedung semakin tinggi, respons struktur terhadap beban lateral (baik akibat beban gempa maupun beban angin) menjadi semakin penting.

Di antara berbagai cara untuk memperoleh kestabilan, aksi rangka adalah yang paling kurang efisien dalam memberikan kestabilan lateal, dan umumnya hanya digunakan apabila beban lateral tidak berlebihan – seperti pada gedung-gedung bertingkat menengah. Gedung rangka baja khas yang memikul beban dengan aksi

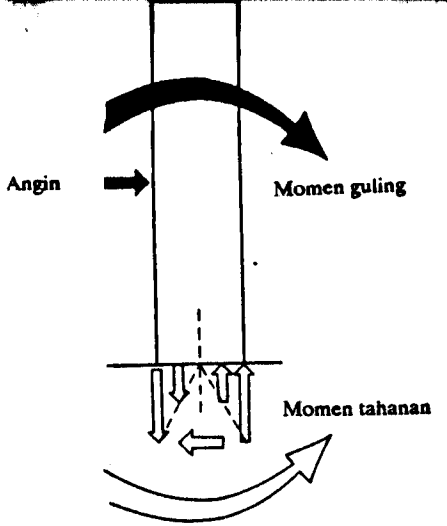
rangka, misalnya, hanya efisien untuk tinggi sampai sekitar 10 tingkat. Untuk struktur yang lebih tinggi lagi cara ini sudah tidak efisien, yang ditunjukkan dengan terlalu banyaknya material rangka yang digunakan.

Meskipun pada struktur bertingkat menengah di mana aksi rangka mungkin masih cocok digunakan, tidak ada perbedaan dalam kapasitas pemikul beban di antara jenis-jenis rangka yang mungkin. Sistem rangka baja mempunyai kekhususan dalam hal sistem ini dapat didesain pada hampir segala situasi. Sebaliknya, sistem beton bertulang harus digunakan secara lebih hati-hati. Sebagaimana akan dibahas secara lebih rinci pada bagian lain bab ini, misalnya, sistem seperti plat datar dan yang menggunakan kolom-kolom mempunyai kapasitas-pikul-beban lateral yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem beton cor di tempat. Elemen plat datar khususnya cocok untuk memikul momen (yang tidak besar) yang diakibatkan oleh beban relatif ringan dari lantai, dan *bukan* momen-momen yang diakibatkan oleh beban lateral besar. Plat pada sistem ini terlalu tipis untuk dapat memikul momen tersebut. Sistem-sistem yang menggunakan elemen struktur horizontal, seperti sistem slab-dan-balok-dua-arah atau sistem wafel, lebih efisien dalam memberikan aksi rangka pada kedua arah. Apabila plat datar digunakan, untuk memperoleh kapasitas-pikul-beban lateral yang cukup harus digunakan mekanisme tambahan lainnya. Pada gedung apartemen segiempat yang umum, msailnya, yang sering digunakan adalah konstruksi plat datar, dan dinding-dinding ujung dibuat berfungsi sebagai bidang geser. Oleh karena itu, sistem plat datarnya dapat didesain terutama untuk memikul beban vertikal. Dinding-dinding di sekitar daerah elevator juga sering kali secara khusus didesain untuk berfungsi sama.

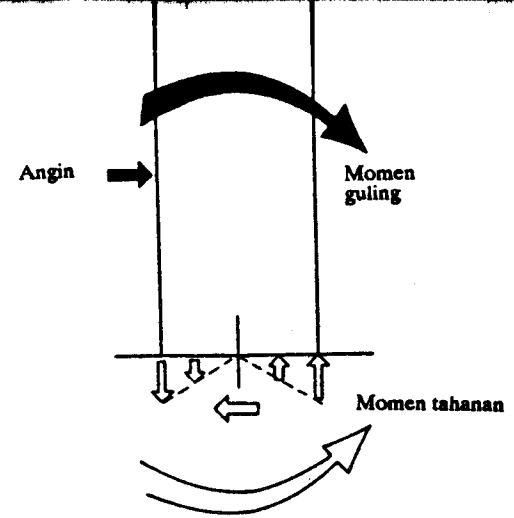
Apabila gedung itu semakin tinggi, sampai bertingkat menengah, kita dapat menggunakan *setiap* jenis struktur rangka, ditambah mekanisme pengekang lateral, misalnya *bracing* diagonal di sekitar daerah elevator, atau menggunakan cara-cara struktural lain yang sangat berbeda.

Untuk mendapatkan *feeling* jenis manakah yang mungkin untuk struktur yang *sangat* tinggi, ada gunanya apabila kita mengingat kembali prinsip-prinsip dasar bagaimana suatu struktur bertingkat tinggi memikul beban lateral. Akibat aksi beban lateral, struktur ini berperilaku seperiti elemen struktur kantilever. Beban lateral cenderung menghasilkan momen guling, yang harus diimbangi oleh momen tahanan internal yang dihasilkan oleh struktur. Momen tahanan internal pada umumnya dapat diberikan oleh kopel yang dihasilkan oleh gaya-gaya yang timbul pada elemen-elemen struktur vertikal (lihat Gambar 14–10). Apabila gedung itu sangat langsing, maka terjadi lengan momen kecil di antara gaya-gaya pada elemen struktur vertikal, yang berarti harus ada gaya yang sangat besar agar menghasilkan momen internal yang cukup. Gedung yang tingginya sama, tetapi mempunyai dasar yang lebih lebar dan umumnya lebih tidak langsing, dapat memberikan momen tahanan internal yang sama, tetapi gaya yang timbul pada elemen struktur vertikal lebih kecil. Jelaslah bahwa semakin besarnya lengan momen ini lebih menguntungkan.

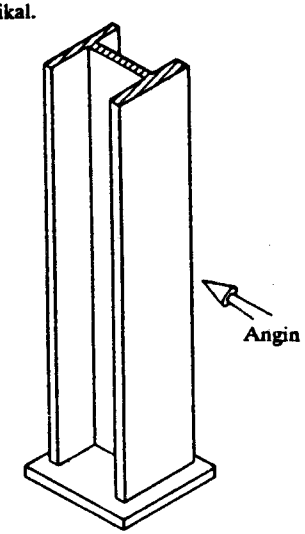
Tinjauan gedung bertingkat banyak sebagai kantilever vertikal sangat berguna juga dalam memberikan respons desain lainnya. Pada Bab 6 telah disebutkan bahwa penggunaan paling efisien material lentur akan diperoleh dengan meletakkan



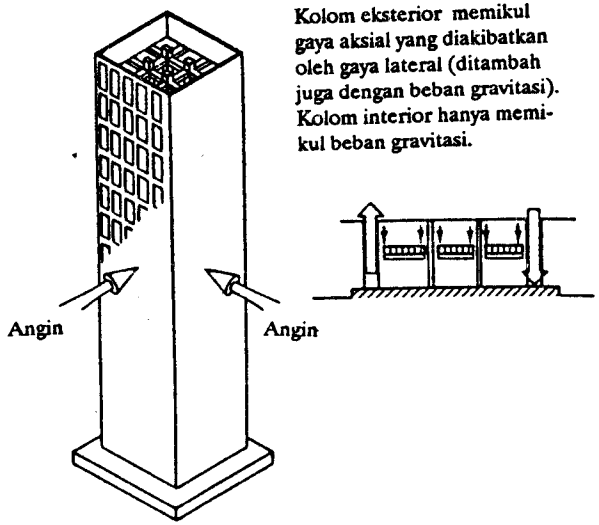
(a) Gaya angin yang bekerja pada muka gedung bertingkat banyak dapat menimbulkan momen guling yang harus dapat diimbangi oleh momen tahanan internal yang dihasilkan oleh gaya-gaya pada elemen kolom. Struktur demikian berperilaku menyerupai balok kantilever vertikal.



(b) Besar gaya-gaya yang timbul pada kolom umumnya sebanding dengan lengan momen antara kolom-kolom. Kolom pada gedung yang relatif lansing akan mengalami gaya yang lebih besar dari pada yang dialami oleh kolom pada gedung yang relatif tidak langsing.

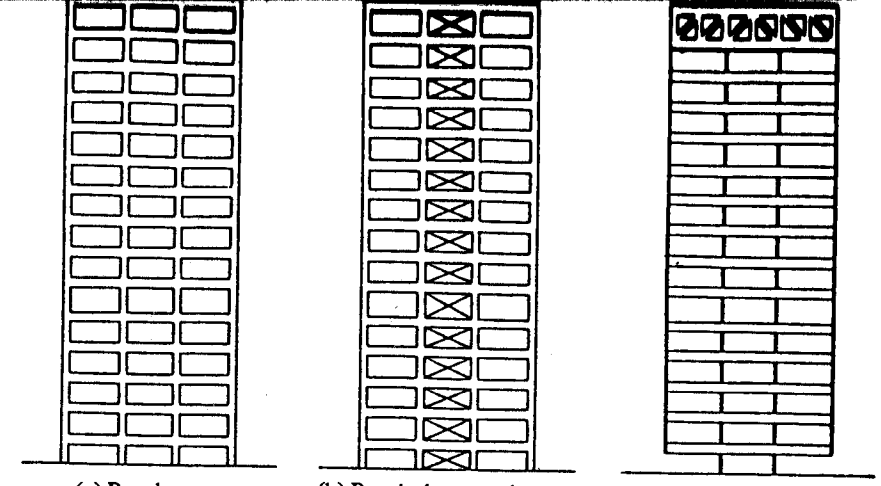


Pada struktur yang sangat tinggi, efisiensi akan diperoleh dengan memandang gedung tersebut sebagai balok kantillever vertikal yang dibebani, mendistribusikan materialnya sedemikian hingga memberikan momen inersia besar.

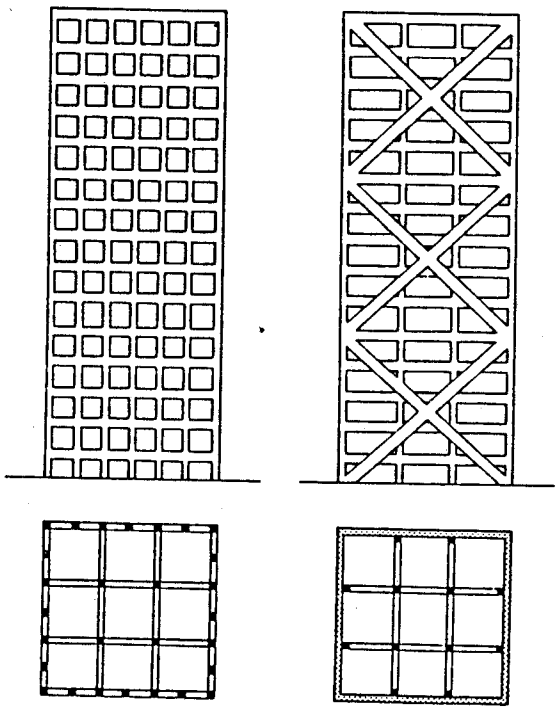


(d) Banyak struktur yang telah dibangun berdasarkan prinsip-prinsip yang telah disebutkan pada (c). Struktur tersebut harus dapat memikul gaya lateral dari segala arah. Dengan demikian akan diperoleh struktur jenis tabung yang kolom eksteriornya dapat memberikan momen tahanan terhadap momen guling akibat gaya lateral. Kolom interior didesain hanya untuk memikul beban gravitasi.

GAMBAR 14–10 Gedung sangat tinggi dapat dipandang sebagai balok kantiliver vertikal.



(a) Rangka (b) Rangka berpengekang (c) Struktur tergantung, *core* beton bertulang



(d) Struktur tabung. kolom eksterior mempunyai jarak berdekatan. Balok tepi horizontal secara monolit menghubungkan kolom-kolom hingga membentuk tabung eksterior yang harus dapat memikul semua gaya lateral selain juga gaya graitasi. Kolom interior hanya memikul gaya gravitasi

(e) Rangka berangka batang *(trussed frame)*. Kekakuan lateral pada struktur yang sangat tinggi dapat sangat diperbesar dengan menggunakan elemen *bracing* diagonal (baik pada struktur rangka maupun pada struktur tabung). Gaya lateral dipikul oleh elemen vertikal eksterior (dari rangka) dan elemen diagonal eksrterior (dari rangka batang). Kolom interior hanya memikul gaya vertikal.

GAMBAR 14–11 Pendekatan struktural tipikal pade konstruksi bertingkat banyak.

sebanyak mungkin material yang sejauh mungkin dari sumbu netral penampang. Dengan demikian, momen inersia total penampang akan semakin besar. Prinsip ini juga dapat diterapkan pada desain rangka batang. Pada gedung bertingkat banyak, penggunaan prinsip ini memberi arti bahwa semakin banyak material (dalam hal ini adalah elemen vertikal) yang harus diletakkan di daerah tepi, jadi bukan di daerah tengah (lihat Gambar 14–11). Banyak struktur bertingkat tinggi yang ditinjau secara demikian. Susunan balok dan kolom eksterior didesain agar memberikan cincin, atau tabung, yang sangat kaku, yang mampu memikul beban lateral dari sembarang arah. Kolom-kolom eksterior umumnya mempunyai jarak yang sangat berdekatan. Balok-balok tepi umumnya secara kaku dihubungkan dengan kolom agar keseluruhan susunan tepi tersebut dapat berperilaku secara integral – seperti elemen permukaan yang kaku. Meskipun susunan rangka terluar dapat memikul beban gravitasi dan berperilaku seperti rangka pada arah horizontal, fungsi utamanya adalah untuk memikul gaya-gaya yang diakibatkan oleh momen guling dari beban lateral. Kolom-kolom interior didesain hanya untuk memikul beban gravitasi sehingga umumnya dapat mempunyai penampang lebih kecil daripada penampang kolom eksterior. Perlu diperhatikan bahwa dalam desain sistem lantai yang direncanakan akan mampu bekerja sebagai suatu unit dalam memikul beban lateral, kekakuan tabung seperti disebut di atas dapat diperbesar lagi dengan penambahan *bracing* melintang pada muka-muka terluar struktur.

Kontrol Gerakan dan Defleksi. Respons struktural untuk gedung bertingkat banyak yang kita bahas sejauh ini hanya berkaitan dengan masalah kekuatan. Bagaimana pun, ada hal lain yang tidak kalah pentingnya, yaitu tinjauan gerakan dan defleksi yang diakibatkan oleh efek dinamis angin. Gedung bertingkat banyak, umpamanya, pada umumnya akan mengalami goyangan apabila mengalami beban angin. Meskipun angin bersifat *steady-state* (berada dalam keadaan mantap), perilaku dinamis tetap ada. Pada saat angin meniup gedung, pada gedung akan terjadi sedikit perubahan bentuk. Dengan demikian, besar dan arah angin juga akan sedikit berubah. Membesarnya ataupun mengecilnya gaya-gaya akibat fenomena ini, yang diikuti dengan aksi dinamis angin yang mungkin ada, dapat menyebabkan gedung itu berosilasi. Pada umumnya gedung berosilasi terhadap defleksi rata-rata pada arah gaya angin. Besar dan frekuensi osilasi ini bergantung pada karakteristik gaya angin dan kekakuan serta distribusi massa gedung itu sendiri.

Osilasi dan defleksi itu sangat penting diperhatikan. Defleksi yang berlebihan dapat mempengaruhi fungsi elemen-elemen gedung lainnya meskipun struktur itu sendiri tidak rusak. Osilasi dapat menyebabkan ketidaknyamanan pada pengguna gedung. Orang tidak dapat merasakan getaran apabila terjadinya perlahan-lahan, tetapi apabila terjadinya percepatan sangat cepat, orang dapat merasakannya. Dengan demikian, dapat terjadi ketidaknyamanan akibat gerakan. Berapa taraf percepatan yang masih dapat diterima, tidak mudah ditentukan meskipun telah ada batas-batas yang diusulkan berdasarkan penyelidikan. Selain itu, sulit menganalisis suatu gedung untuk memprediksi gerak bagaimanakah yang secara aktual akan terjadi untuk suatu keadaan tertentu. Prosedur yang paling umum adalah memodelkan struktur sebagai susunan pegas (yang mempunyai elastisitas yang

didapat dari studi karakteristik beban deformasi aktual pada struktur y
sangkutan) dan menggunakan massa yang menunjukkan berat gedung. Vibrasi
seperti ini yang dibebani secara dinamis dapat digunakan untuk mempro
respons struktur aktual.

Memandang struktur bertingkat banyak sebagai susunan massa pegas
sangat berguna dalam mempelajari respons defleksi maupun rotasi yang berlebih
Jelas bahwa salah satu cara untuk mengontrol defleksi adalah memperbesar
kakuan struktur (tidak selalu harus kekuatannya) sampai osilasi yang diakibatk
oleh angin dapat mencapai tingkat sekecil yang masih dapat diterima. Memperb
ukuran elemen struktur, menggunakan *bracing* diagonal, atau bidang-bidang
dan mengatur distribusi penempatan material merupakan cara-cara memperb
kekakuan.

Cara lain untuk mengontrol gerakan, khususnya percepatan, adalah dengan
membuat *mekanisme peredam* (cara kerjanya serupa dengan alat yang menyebabkan
pintu menutup perlahan-lahan). Alat peredam ini umumnya dipasang pada titik
titik hubung antara balok dan kolom. Pada saat gerakan mulai, alat ini menyerap
energi dan meredam gerakan.

Gerakan berlebihan juga dapat dikontrol dengan memasang massa sangat besar
yang terdiri atas material yang dipasang pada rol dan dihuubngkan pada struktur
gedung dengan menggunakan peredam. Alat ini, yang sering disebut *massa peredam*
diletakkan pada lantai teratas pada suatu gedung. Pada saat gerakan akan mulai
gaya inersia pada massa cenderung membuat massa itu diam. Dengan demikian
gerakan gedung menyebabkna peredam menyerap energi dan meredam gerakan.

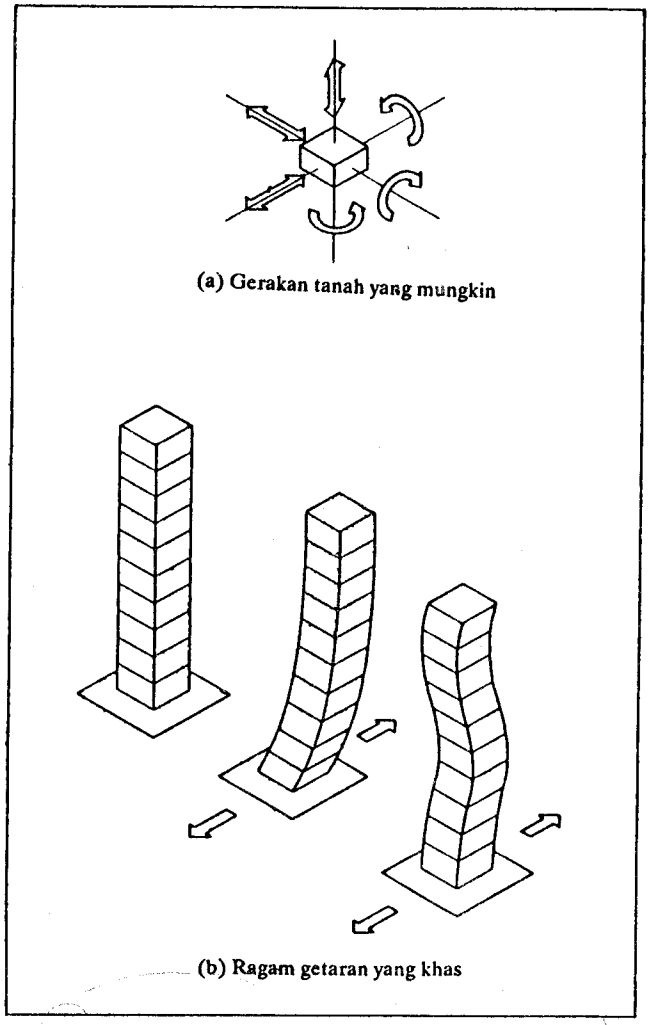
Penggunaan peredam seperti tersebut di atas biasanya sangat dibatasi pada
gedung bertingkat sangat tinggi. Bagaimana pun, peredam seperti ini memang telah
banyak memberikan hasil yang baik pada berbagai situasi. Hal yang lebih umum
dilakukan adalah mengontrol kekakuan struktur. Aturan sederhana yang sering
digunakan untuk membatasi percepatan dan defleksi apabila analisis dinamis tidak
cocok atau layak adalah menggunakan analisis beban statis dan membatasi deflek
maksimum yang terjadi sehingga tidak melebihi, katakanlah, $h/500$ apabila h adalah
tinggi gedung (dalam feet). Kekakuan struktur diatur agar kriteria tersebut ter
penuhi. Pendekatan demikian jauh lebih sederhana daripada analisis dinamis, tetapi
masih cukup baik digunakan.

14.3.4 Tinjauan Desain Gempa

Prinsip-prinsip Umum. Sebagaimana telah disebutkan pada Bab 3, gempa mem
punyai kecenderungan menimbulkan gaya-gaya lateral pada struktur. Dengan de
mikian, prinsip-prinsip yang telah disebutkan pada awal bab ini dapat diterapkan
pada desain struktur tahan gempa seperti juga struktur tahan angin. Bagaimana pun
efek dinamis beban gempa menjadikan analisisnya lebih kompleks. Masih banyak
silang pendapat di antara para ahli mengenai beban gempa, khususnya mengena
strategi bagaimanakah yang terbaik untuk desain gedung pada daerah yang mem
punyai potensi mengalami gempa. Berikut ini akan dibahas beberapa hal sehubungan
dengan strategi-strategi yang mungkin dilakukan.

Ada beberapa jenis dasar yang termasuk kategori gempa bumi, antara lain *keruntuhan permukaan*, guncangan *tanah*, *keruntuhan tanah*, dan *tsunami* (gelombang laut yang diakibatkan oleh gempa bumi). Meskipun efek-efek tersebut sangat penting, pada buku ini hanya akan dipusatkan pada efek guncangan tanah. Pembaca dipersilakan mempelajari pembahasan fenomena gempa lainnya pada banyak rujukan lain.

Sebelum sampai pada pembahasan mengenai desain struktur tahan gempa, ada baiknya kita meninjau dulu perilaku struktur yang mengalami gempa bumi (lihat juga Bab 3.2.4). Pada Gambar 14–12 diilustrasikan ragam getaran karakteristik



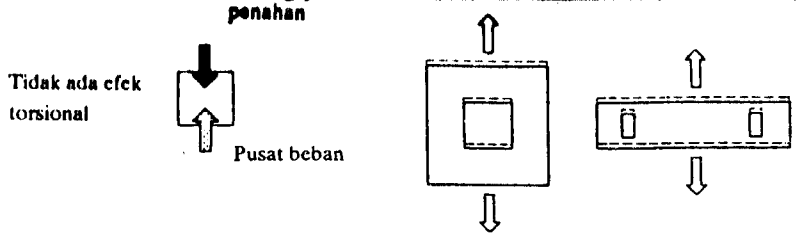
GAMBAR 14–12 Gerakan yang diakibatkan gempa pada gedung bertingkat banyak.

suatu gedung tinggi. Seperti terlihat pada gambar tersebut, percepatan tanah dapat menyebabkan semua lantai bergerak pada arah yang sama, atau dapat pula masing-masing lantai mempunyai percepatan yang berbeda pada berbagai arah. Gerakan bolak-balik seperti ini dapat terjadi karena gedung elastis mempunyai kecenderungan bersifat seperti pegas, yang akan kembali ke posisi semula (vertikal) apabila mengalami translasi ataupun percepatan. Karena adanya gaya inersia, massa bagian atas pada gedung itu mengalami translasi tidak sama dengan translasi dasar gedung. Pada saat massa bagian atas mulai bergerak kembali ke posisi vertikal sesudah translasi terjadi, akan timbullah momentum. Karena adanya momentum, massa atas dapat mengalami translasi kembali hingga melewati sumbu vertikal. Apabila selama proses ini gerakan tanah berubah sedemikian rupa sehingga percepatan dan translasinya bolak-balik, dapat terjadi deformasi yang sangat rumit, yang diakibatkan oleh adanya gaya inersia pada massa gedung yang cenderung meneruskan gerakan yang telah terjadi, sementara pada saat yang sama gerakan dalam arah berlawanan juga baru mulai terjadi.

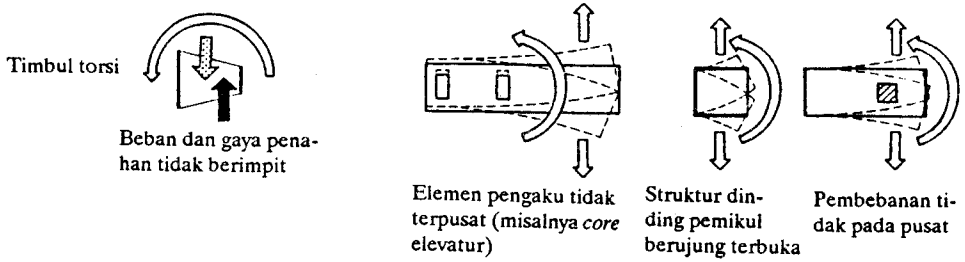
Berkenaan dengan adanya percepatan tersebut, ada gaya inersia yang sangat penting diperhatikan pula dalam desain. Selain gaya-gaya yang secara normal sudah diduga akan terjadi, ada juga gaya-gaya lain yang dapat terjadi pada struktur gedung sebagai akibat dari kekhususan gedung itu. Torsi, misalnya, dapat terjadi karena tidak simetrisnya lokasi massa-massa pada gedung. Efek ini akan dibahas lebih lanjut berikut ini.

Tinjauan Perencanaan dan Desain Umum. Mungkin prinsip desain yang paling utama dalam desain gedung tahan gempa adalah memastikan bahwa setiap massa umum pada gedung (lantai, atap, dan sebagainya) mempunyai lokasi simetris satu sama lain. Gaya lateral akibat gempa, tentu saja, mempunyai sifat inersial, jadi berkaitan langsung dengan setiap massa pada gedung tersebut. Lokasi massa yang tidak simetris dapat menyebabkan gaya-gaya pada massa tersebut menimbulkan momen torsi terhadap gedung yang pada akhirnya dapat meruntuhkan gedung itu. Hal ini merupakan prinsip yang sama dengan yang telah disebutkan sebelum ini dalam kaitannya dengan beban angin (lihat Gambar 14–7), tetapi pada tinjauan beban gempa, masalah torsi ini merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan.

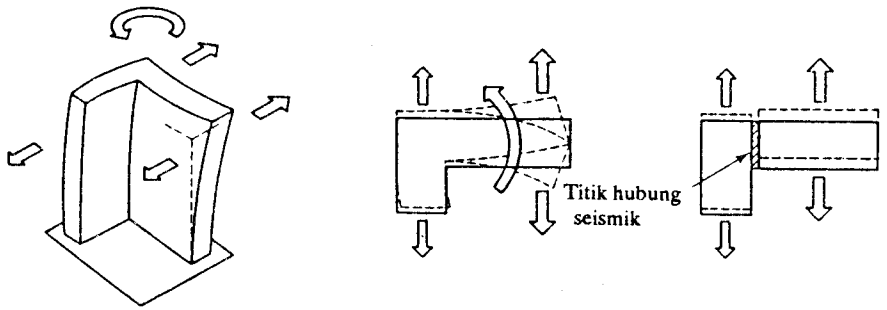
Prinsip-prinsip yang telah disebutkan di atas mempunyai implikasi yang sangat berarti pada keseluruhan bentuk gedung karena, baik distribusi massa maupun penempatan mekanisme penahan beban lateral, sangat dipengaruhi oleh bentuk gedung. Gedung berbentuk *L*, misalnya, jelas mempunyai distribusi massa tak simetris, yang pada umumnya juga mempunyai elemen pengaku tidak simetris. Pada bentuk ini gaya-gaya torsional dapat timbul sebagai akibat efek torsi dari beban lateral. Cara lain untuk memahami mengapa konfigurasi seperti ini tidak dikehendaki adalah dengan memandang gedung itu sebagai dua bagian massa terpisah (masing-masing sisi *L*). Setiap bagian mssa ini cenderung bergetar pada frekuensi alami masing-masing. Karena kekakuan kedua bagian ini berbeda, periode alaminya juga berbeda. Kondisi ini dapat mengakibatkan ketidakserasian defleksi pada lokasi pertemuan kedua mssa itu. Sebagai akibatnya, pada lokasi ini dapat terjadi kerusakan. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan *titik hubung*



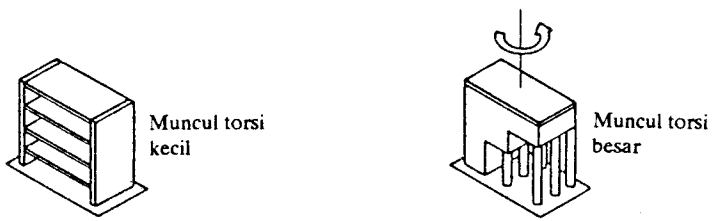
(a) Struktur simetris tidak mengalami gaya torsi besar sehingga jenis struktur ini lebih dikehendaki dibandingkan dengan struktur tak simetris.



(b) Struktur yang tidak simetris, baik karena konfigurasinya atau karena penempatan secara tidak simetris elemen-elemen pemikul beban lateral, pada umumnya mengalami gaya torsi besar yang dapat sangat merusak. Penempatan massa secara tidak simetris dapat juga menyebabkan efek torsi.



(c) Konfigurasi tidak simetris seperti bentuk L dan H tidak mempunyai ketahan cukup terhadap efek torsional. Kerusakan umumnya terjadi ada pojok-pojoknya. Pemisahan massa gedung tersebut atas bagian-bagian yang lebih kecil akan memungkinkan masing-masing bagian bergetar sendiri pada saat mengalami beban gempa (dengan menggunakan titik hubung seismik).



(d) Gedung yang tidak simetris pada arah vertikal juga akan mengalami efek torsional yang besar. Dinding geser diskontinu juga sering menimbulkan masalah.

GAMBAR 14–13 Tinjauan perencanaan umum: simetris versus tak-simetris.

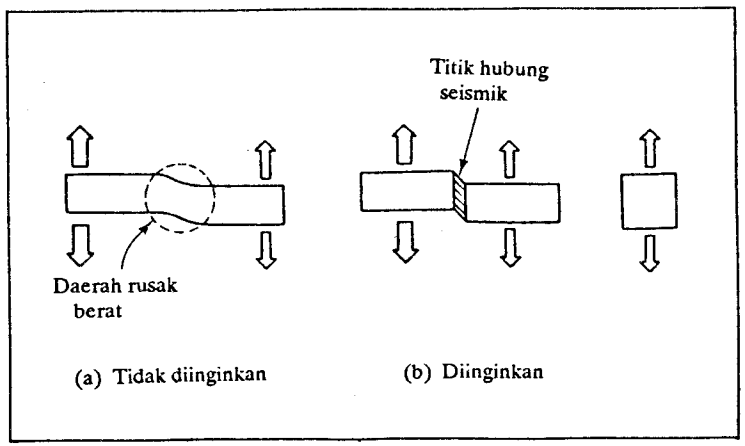
seismik (seismic joints) yang secara fisik memisahkan kedua bagian massa itu sehingga masing-masing dapat bergerak bebas. Titik hubung seismik ini secara konsep mempunyai kesamaan dengan titik hubung ekspansi.

Dari tinjauan desain tahan gempa, bentuk gedung yang lebih dikehendaki adalah yang mempunyai denah sederhana (misalnya bujursangkar, lingkaran); bentuk-bentuk *L*, *T*, atau *H* biasanya merupakan bentuk yang sulit digunakan untuk tahan gempa. Untuk itu umumnya dapat diatasi dengan menggunakan titik hubung seismik. Bagaimana pun, kesulitan dapat terjadi pada gedung yang denahnya simetris, tetapi kekakuannya (lokasi elemen-elemen pengaku) tidak simetris. Ini adalah kondisi yang sering terjadi apabila lokasi inti gedung (daerah elevator) tidak simetris [lihat Gambar 14–13(b)].

Bentuk U yang sering dijumpai pada banyak gedung merupakan contoh lain gedung yang tidak simetris dan mudah mengalami efek torsi. Gedung demikian biasanya mempunyai pengaku pada muka yang terbuka, yaitu dengan menggunakan rangka. Diafragma atap kaku juga biasanya digunakan.

Gedung yang benar-benar simetris masih juga dapat mengalami torsi, misalnya apabila lokasi beban hidup tidak simetris – kondisi yang umumnya terjadi pada gudang. Situasi seperti ini dapat diatasi pada desain.

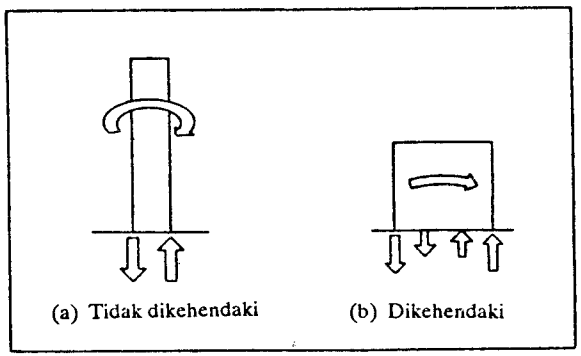
Prinsip-prinsip mengenai karakteristik kekakuan dan massa yang diusahakan simetris pada gedung, selain berlaku pada denah, juga berlaku pada dimensi vertikal. Apabila karakteristik kekakuan di seluruh dimensi vertikal gedung berbeda-beda, misalnya, dapat terjadi efek torsional yang tak diinginkan pada berbagai tingkat gedung. Gedung yang mempunyai dinding geser diskontinu mempunyai masalah demikian.



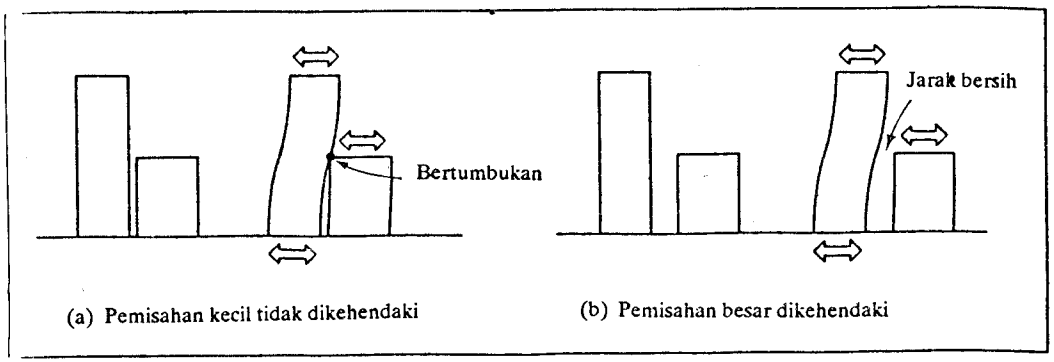
Gambar 14-14 Gedung yang mempunyai denah sangat panjang mempunyai kemampuan lebih kecil dalam menahan dengan baik gaya-gaya akibat berbedanya gerakan tanah di sepanjang gedung tersebut dibandingkan dengan bentuk yang kompak. Gedung panjang seperti ini sebaiknya dipisahkan menjadi beberapa bagian dengan menggunakan titik hubung seismik.

Ada mekanisme lain yang mempengaruhi kepekaan gedung terhadap gerakan gempa. Gedung yang mempunyai denah sangat panjang, misalnya, pada umumnya dihindari meskipun denahnya simetris (Gambar 14–14). Semakin panjang denah suatu gedung, semakin besar kemungkinan ujung-ujung gedung mengalami gerakan tanah yang berlainan. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya kecenderungan saling memisahkan diri antara ujung-ujung gedung tersebut. Desain untuk mencegah pemisahan ini sangat sulit. Hal yang umum dilakukan adalah memisahkan benar-benar gedung panjang menjadi bagian-bagian yang terpisah, yang satu sama lain dapat dihubungkan oleh titik hubung seismik.

Tinjauan dasar lainnya adalah bahwa gedung langsing bertingkat banyak mempunyai kemampuan lebih baik dalam menahan momen guling akibat beban gempa dibandingkan dengan gedung lebar dan rendah (lihat Gambar 14–15).



GAMBAR 14–15 Gedung yang relatif langsing mempunyai lebih kecil kemampuan memikul momen guling akibat gempa.

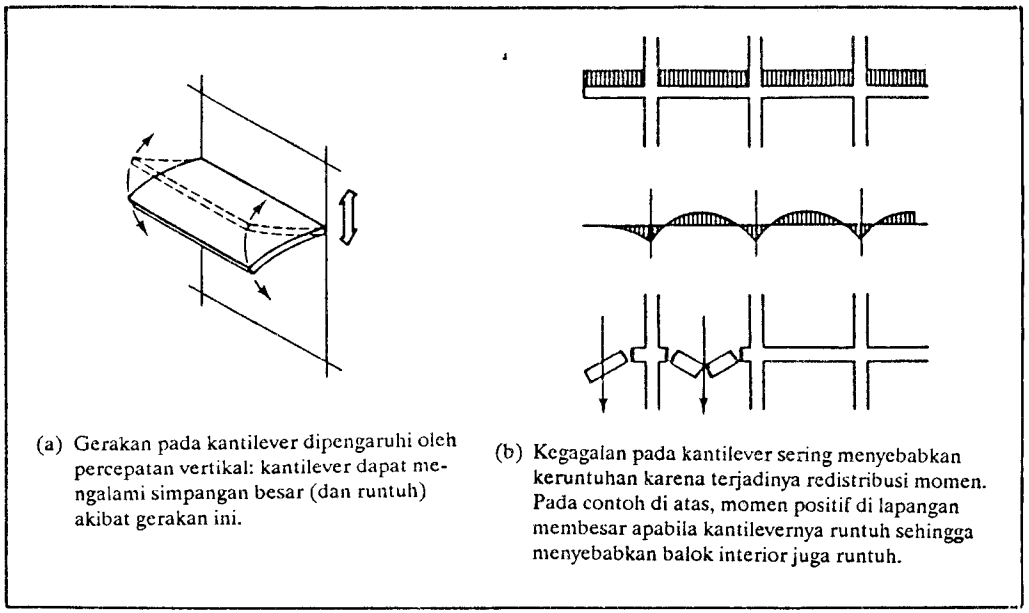


GAMBAR 14–16 Gedung yang saling berdekatan harus dipisahkan benar-benar untuk mencegah tumbukan pada saat gempa terjadi.

Gedung yang dibuat saling berdekatan harus mempunyai jarak pemisah yang cukup, sedemikian rupa sehingga masing-masing dapat dengan bebas bergetar pada ragam alaminya, tanpa saling bertumbukan. Apabila jarak ini tidak diperhatikan dengan baik, dapat terjadi kerusakan yang serius (lihat Gambar 14–16).

Gaya-gaya sehubungan dengan gerak lateral memang merupakan hal yang sangat penting dalam desain. Akan tetapi, ada percepatan arah vertikal akibat gerakan gempa yang juga dapat menimbulkan masalah. Kantilever, umpamanya, khususnya dapat mengalami keruntuhan akibat gerakan vertikal (lihat Gambar 14–17). Dalam hal ini, keruntuhan sering kali juga terjadi pada elemen struktur interior karena gerakan vertikal pada kantilever ini dapat menyebabkan terjadinya redistribusi momen.

Karakteristik Umum Struktur Tahan Gempa. Struktur-struktur yang menerus dan kurang-lebih terdistribusi merata di seluruh gedung umumnya dapat berperilaku baik apabila mengalami beban gempa. Alasan utama hal ini adalah tahanan gempa suatu struktur sangat bergantung pada kemampuannya menyerap energi yang dihasilkan oleh gerakan tanah. Struktur yang dihubungkan secara sendi, misalnya susunan *post-and-beam*, kurang dapat menyerap energi dibandingkan dengan struktur menerus (misalnya rangka dengan titik hubung monolit). Pembentukan sendi plastis pada struktur rangka (yang *harus* lebih dulu terjadi sebelum *collapse)* memerlukan banyak masukan energi. Struktur menerus, dengan demikian, cukup efektif untuk digunakan

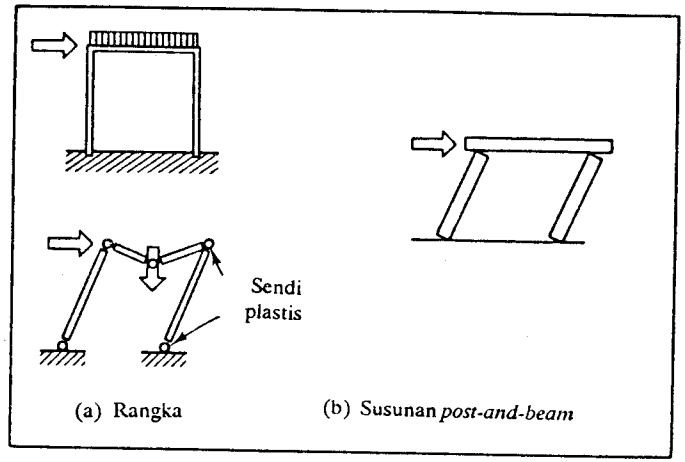


(a) Gerakan pada kantilever dipengaruhi oleh percepatan vertikal: kantilever dapat mengalami simpangan besar (dan runtuh) akibat gerakan ini.

(b) Kegagalan pada kantilever sering menyebabkan keruntuhan karena terjadinya redistribusi momen. Pada contoh di atas, momen positif di lapangan membesar apabila kantilevernya runtuh sehingga menyebabkan balok interior juga runtuh.

GAMBAR 14–17 Pentingnya memperhatikan komponen vertikal gerakan tanah akibat gempa

pada gedung di daerah gempa (Gambar 14–18). Baik baja maupun beton bertulang cor di tempat yang didesain untuk bersifat daktil pada saat mengalami beban gempa dapat digunakan. Struktur beton pracetak, karena tidak mempunyai kontinuitas, sulit untuk dapat digunakan sebagai struktur tahan gempa.

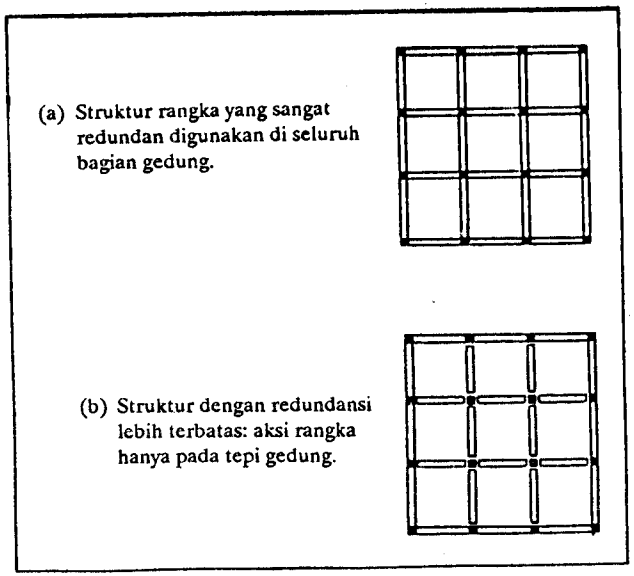


GAMBAR 14–18 Struktur menerus umumnya lebih dikehendaki daripada struktur yang berhubungan sendi. Pembentukan sendi plastis yang diperlukan pada struktur menerus sebelum terjadinya *collapse* dapat menyebabkan terserapnya banyak energi.

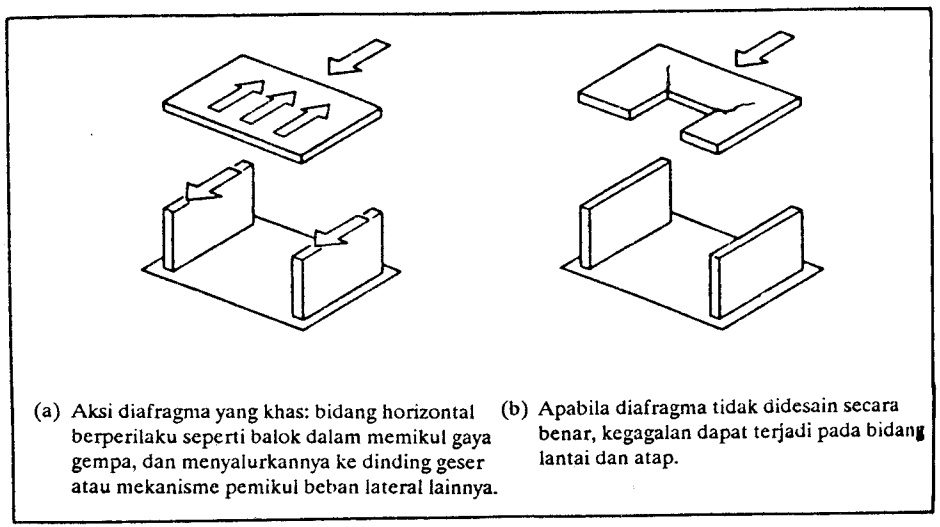
Pada struktur-struktur menerus juga ada perbedaan. Gambar 14–19 mengilustrasikan denah dua struktur menerus yang mempunyai kemampuan memikul beban lateral dengan aksi rangka. Struktur rangka pertama, yang terlihat pada Gambar 14–19(a), yang mempunyai rangka di seluruh bagian struktur, lebih baik digunakan daripada struktur rangka kedua [pada Gambar 14–19(b)] yang hanya mempunyai rangka di sekelilingnya. Struktur pertama mempunyai *redundansi* lebih banyak daripada struktur kedua sehingga mempunyai cadangan kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur kedua. Keruntuhan pada beberapa elemen struktur tepi saja pada Gambar 14–19(b) sudah dapat mengakibatkan kehancuran total seluruh struktur, sementara pada struktur pertama, untuk menjadikan kehancuran total, diperlukan keruntuhan relatif banyak elemen strukurnya terlebih dulu. Pada umumnya, struktur-struktur yang mempunyai *redundansi* banyak lebih baik daripada yang sedikit.

Karakteristik umum lain pada struktur tahan gempa adalah bahwa balok dan kolom yang terdapat padanya tersusun secara koaksial. Adanya *offsets* maupun elemen struktur yang tidak segaris pada umumnya menimbulkan masalah dalam desain.

Struktur-struktur tahan gempa pada umumnya mempunyai bidang-bidang lantai dan atap yang didesain sebagai diafragma kaku yang dapat menyalurkan gaya-gaya inersial ke elemen-elemen penahan beban lateral dengan aksi seperti balok (Gambar 14–20).

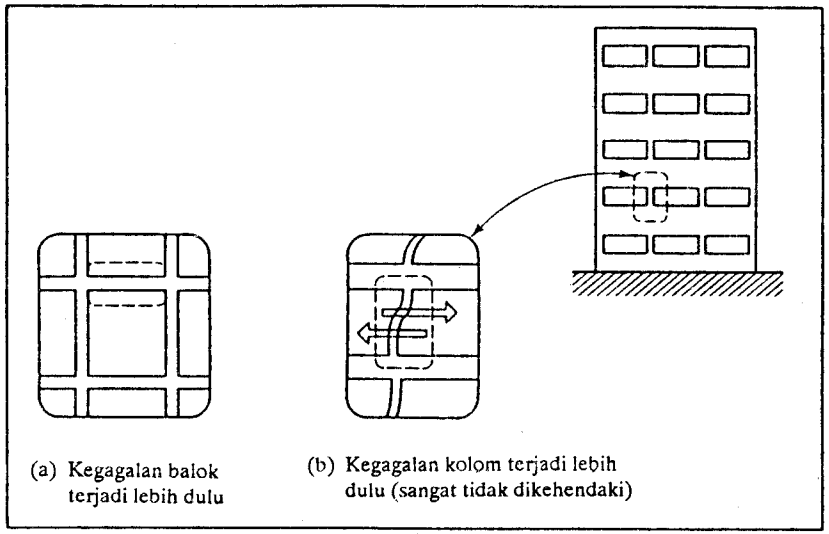


GAMBAR 14–19 Struktur redundan versus non-redundan: gedung dengan sistem redundan tinggi umumnya lebih baik daripada struktur dengan sedikit redundan pada saat mengalami gempa.



GAMBAR 14–20 Pentingnya elemen atap dan lantai kaku: agar gaya inersial akibat gempa dapat disalurkan ke elemen-elemen pemikul beban lateral; elemen lantai dan atap harus mampu berperilaku sebagai diafragma kaku.

**Aspek lain pada struktur tahan gempa adalah struktur ini didesain sedemikian rupa sehingga elemen horizontal akan rusak terlebih dulu akibat gempa sebelum rusaknya elemen vertikal (lihat Gambar 14–21). Kerusakan ini tidak boleh diawali pada elemen struktur vertikal. Alasan untuk hal ini didasarkan pada tinjauan menyelamatkan kehidupan. Elemen horizontal pada struktur *menerus* (misalnya balok atau *slab)* jarang jatuh meskipun sudah mengalami kerusakan berat, dan pada saat rusak berat, keruntuhan yang terjadi relatif dapat dilokalisasi. (hal ini tidak terjadi pada elemen struktur yang berhubungan sendi.) Sebaliknya, apabila kolom yang mengalami kerusakan tersebut, keruntuhan total sangat mungkin terjadi. Keruntuhan kolom pada umumnya menyebabkan bagian lain pada struktur mengalami keruntuhan juga.

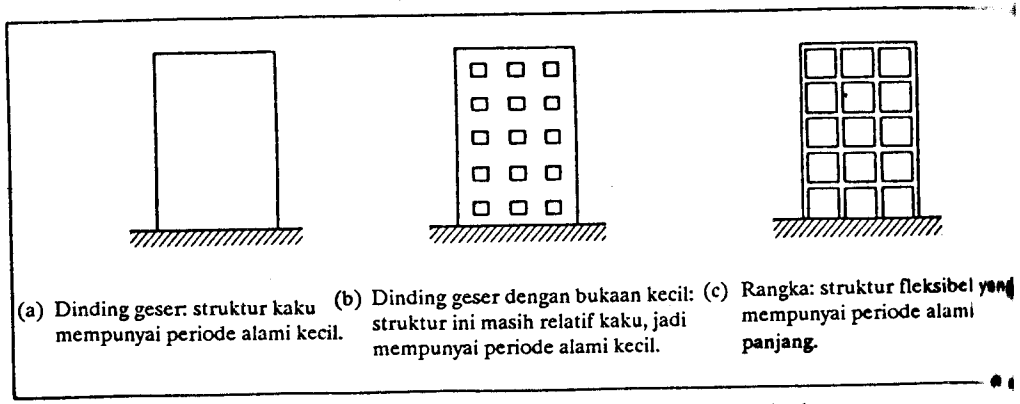


GAMBAR 14–21 Elemen-elemen struktur harus didesain sedemikian rupa sehingga apabila terjadi kegagalan akan diawali pada elemen struktur horizontal, bukan pada elemen vertikal.

Agar keruntuhan dialami oleh elemen horizontal terlebih dulu, diperlukan hal khusus dalam desain elemen struktur horizontal maupun vertikal. Balok yang sangat tinggi, yang terletak di atas kolom ringan, pada umumnya harus dihindarkan karena pengalaman menunjukkan bahwa banyak gedung yang mengalami kerusakan besar pada kolom ringan yang harus memikul semua gaya lateral dengan geser dan lentur. Sebaliknya, dinding geser yang mempunyai beberapa bukaan kecil pada umumnya berperilaku lebih baik. Desain yang baik, perlu diingat, dapat membuat semua jenis tersebut berperilaku baik terhadap beban lateral.

Struktur Fleksibel atau Kaku. Salah satu hal penting yang perlu diperhatikan dalam desain seismik adalah *periode alami getaran* gedung. Telah disebutkan pada Bab 3

bahwa apabila gerakan tanah mempunyai frekuensi sangat mendekati periode alami gedung, situasi resonansi dapat timbul dan gaya-gaya yang merusak mulai terjadi. Bagaimana pun, gaya-gaya yang dialami oleh suatu gedung selalu berhubungan langsung dengan periode struktur meskipun kondisi resonansi tidak terjadi. Gaya-gaya yang dispesifikasikan pada peraturan mengenai gedung, misalnya, sering kali ditentukan berdasarkan asumsi bentuk seperti yang telah dibahas pada Bab 3.1, yang berarti bahwa gedung yang mempunyai periode "pendek" (kekakuan besar) harus didesain terhadap gaya-gaya yang lebih besar daripada gedung yang mempunyai periode "panjang" (kekakuan kecil) (lihat Gambar 14–22). Sebagaimana akan dibahas berikut ini, hal ini *bukanlah* satu-satunya faktor yang harus ditinjau dalam menentukan pilihan antara penggunaan struktur kaku (misalnya yang menggunakan dinding geser beton bertulang) atau struktur yang relatif tidak kaku (misalnya rangka baja).



(a) Dinding geser: struktur kaku mempunyai periode alami kecil.

(b) Dinding geser dengan bukaan kecil: struktur ini masih relatif kaku, jadi mempunyai periode alami kecil.

(c) Rangka: struktur fleksibel yang mempunyai periode alami panjang.

GAMBAR 14–22 Struktur-struktur yang berbeda mempunyai perioda alami getaran yang berbeda-beda pula. Faktor ini penting diperhatikan pada desain seismik.

Apabila suatu struktur mempunyai frekuensi yang sangat berbeda dengan frekuensi gerakan tanah, maka struktur itu akan mengalami gaya seismik yang relatif tidak besar dibandingkan dengan struktur yang frekusinya dekat dengan frekuensi gerakan tanah (lihat diskusi pada Bab 3). Gedung yang sangat kaku pada umumnya mengalami gaya gempa (seismik) lebih kecil apabila gerakan tanah mempunyai periode panjang dibandingkan dengan gedung fleksibel, begitu pula sebaliknya. Jadi, jelaslah bahwa penentuan struktur yang relatif kaku harus dilakukan berdasarkan karakter gerakan tanah yang mungkin dialami oleh struktur gedung tersebut. Gerakan aktual yang akan dialami oleh gedung, perlu diingat, *sangat* dipengaruhi oleh perilaku kondisi tanah yang ada di bawahnya dan oleh interaksi gedung-tanah. Pada keadaan tertentu, perilaku umum gerakan tanah dapat diprediksi.

Banyak perencanaan yang umumnya menginginkan penggunaan gedung yang sangat fleksibel (misalnya rangka baja). Gedung demikian pada umumnya juga

didesain sedemikian rupa sehingga kekakuan potensial atau aktualnya diberikan oleh elemen-elemen lain pada gedung (misalnya partisi). Elemen tak struktural seperti ini direncanakan sedemikian rupa sehingga elemen strukturalnya dapat mengalami deformasi bebas tanpa merusak elemen tak struktural (suatu maksud yang sulit dilaksanakan, dan kadang-kadang tidak mungkin).

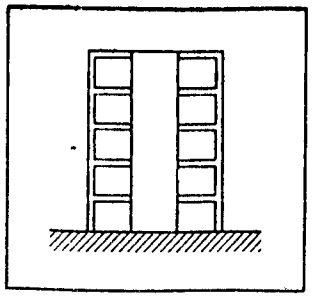
Ringkasnya, keuntungan utama struktur fleksibel akan nyata apabila digunakan pada lokasi yang periode gerakan tanahnya pendek. Daktilitas dan kontinuitas juga secara alami dapat diperoleh karena, pada struktur demikian, material yang digunakan adalah baja. Kerugian akan terjadi apabila periode alami tanah di lokasi itu panjang sehingga ada kemungkinan terjadi resonansi. Elemen tak struktural juga menjadi sulit dirancang sehingga yang akan terjadi adalah kerusakan besar pada elemen tersebut pada saat mengalami beban gempa apabila tidak dirancang dengan benar.

Struktur kaku umumnya menguntungkan untuk digunakan pada lokasi yang mempunyai periode panjang. Elemen tak struktural biasanya relatif mudah untuk dirancang pada gedung kaku karena gerakan (dan deformasi) elemen struktural tidak besar sehingga kerusakan pada elemen tak struktural pada saat gempa tidak besar. Sebaliknya, struktur kaku tidak cocok digunakan untuk lokasi periode pendek. Material yang dapat memberikan kekakuan besar biasanya juga dapat memberikan daktilitas, yang berkaitan dengan masalah penyerapan energi. (Adanya daktilitas itu penting meskipun pada struktur kaku.) Dengan melakukan desain secara benar, struktur kaku (misalnya yang terbuat dari beton bertulang) dapat dibuat menjadi struktur sangat daktil dengan menggunakan penulangan baja secara benar.

Pada banyak hal, sistem campuran juga dapat digunakan. Sistem campuran rangka dan dinding geser seperti terlihat pada Gambar 14–23, misalnya, sering kali merupakan sistem yang baik untuk memikul beban gempa, dan gedung tersebut dapat mempunyai respons secara kaku sehingga membatasi kerusakan pada elemen tak struktural. Semakin daktil suatu rangka, akan memberikan ukuran kapasitas cadangan kekuatan banyak pada saat mengalami beban gempa besar.

Material. Sebagaimana telah disebutkan di muka, struktur menerus pada umumnya lebih diinginkan untuk digunakan pada daerah gempa besar. Seiring dengan masalah kontinuitas, tentunya ada masalah daktilitas. Agar penyerapan energi terjadi, daktilitas itu penting. Baja, secara alami, merupakan material yang daktil sehingga sering digunakan. Beton bertulang cor di tempat juga dapat dijadikan mempunyai daktilitas tinggi dengan mengontrol secara khusus desain penulangannya. Gedung beton bertulang seperti ini sering digunakan pada daerah gempa, sedangkan struktur beton pracetak umumnya tidak cocok untuk digunakan pada daerah gempa karena sulitnya memperoleh sifat menerus dan daktilitas padanya. Struktur seperti ini umumnya juga berupa struktur yang mempunyai massa besar. Massa yang besar mempunyai kontribusi pada besarnya gaya gempa, jadi jelaslah struktur demikian tidak cocok untuk digunakan pada daerah gempa.

Kayu adalah material yang sangat baik untuk digunakan pada daerah gempa. Material ini ringan dan mampu menyerap banyak energi pada saat mengalami deformasi dan sebelum runtuh. Struktur rangka kayu bertingkat rendah adalah struktur yang sangat tahan gempa sehingga baik untuk digunakan pada daerah gempat.

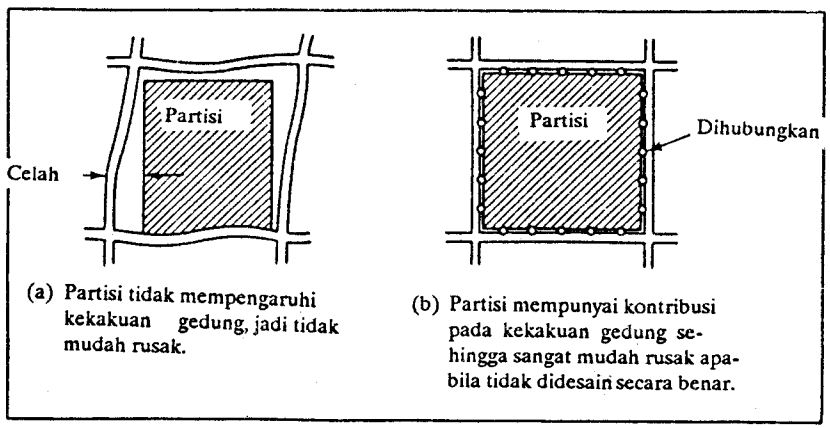


GAMBAR 14–23 Kombinasi sistem dinding/rangka yang membentuk struktur kaku untuk gempa kecil, tetapi masih mempunyai cadangan kekuatan pada gempa besar.

Material seperti bata, apabila tidak diperkuat secara khusus dengan baja, umumnya tidak cocok untuk digunakan pada daerah gempa. Struktur bata sangat bersifat pasif, tetapi hanya mempunyai sedikit daktilitas. Gedung bata sering mengalami retak apabila mengalami gerakan gempa.

Elemen-elemen Nonstruktural. Perlu ditekankan bahwa banyak elemen nonstruktural yang sangat mempengaruhi perilaku dinamis sehingga gaya-gaya seismik juga dipengaruhi. Bergantung pada bagaimana elemen tersebut berinteraksi dengan struktur primer, elemen nonstruktural ini dapat mempengaruhi periode alami getaran struktur, jadi mempengaruhi juga gaya yang timbul. Elemen ini juga mempengaruhi distribusi kekakuan lateral pada gedung.

Ada dua cara yang dapat dipilih sehubungan dengan elemen nonstruktural (Gambar 14–24). Cara pertama adalah dengan menganalisis semua elemen nonstruktural dan memasukkan konstribusinya pada kekakuan struktur primer ke dalam analisis dan desain struktur utama. Dengan memasukkan kontribusi elemen



GAMBAR 14–24 Elemen-elemen non-struktural.

nonstruktural tersebut, kita harus benar-benar melakukan pendetailannya untuk menjamin bahwa elemen itu mempunyai kontribusi pada kekakuan gedung. Cara dasar yang kedua adalah yang telah disebutkan terdahulu, yaitu elemen nonstruktural tidak mempunyai kontribusi sama sekali pada kekakuan struktur. Hal ini dilakukan dengan membuat hubungan detail yang mempunyai celah antara elemen struktur primer dan elemen nonstruktural. Mana di antara kedua cara itu yang dapat diasumsikan terjadi, sangat bergantung pada perencana, apakah menghendaki struktur yang fleksibel atau tidak.

14.4 STRUKTUR TERDISTRIBUSI VERSUS TERPUSAT

Pada desain berbagai jenis struktur ada hal-hal sama yang mungkin timbul. Salah satu dari hal-hal tersebut yang menarik adalah mengenai pemilihan struktur *terpusat* ataukah struktur *terdistribusi.* Yang dimaksud struktur terpusat di sini adalah struktur yang menggunakan elemen struktur sangat besar, tetapi sedikit, sedangkan struktur terdistribusi adalah struktur yang menggunakan elemen struktur lebih sedikit, tetapi relatif lebih banyak. Apakah efisien, misalnya, untuk kondisi bahan yang ada, dipikul oleh satu kolom besar ataukah menggunakan dua kolom yang relatif lebih kecil? Atau, apakah efisien kalau kita menggunakan satu balok besar atau dua balok kecil sejajar? Pada skala yang lebih besar, apakah penggunaan rangka ruang (yaitu sangat banyak elemen struktur yang tersebar di seluruh sistem) lebih disukai dibandingkan dengan penggunaan sederetan rangka batang berjarak jauh dan terbuat dari elemen yang relatif besar? Penentuan pilihan antara kedua hal (terpusat ataukah terdistribusi) itu selalu muncul dalam berbagai situasi.

Sebagaimana yang telah diduga, tidak ada jawaban tegas untuk masalah tersebut. Telah disebutkan sebelum ini bahwa struktur-struktur pembentuk ruang (yang umumnya merefleksikan struktur terdistribusi) adalah yang terbaik untuk digunakan apabila beban yang ada terdistribusi merata dan tidak ada beban terpusat. Prinsip ini dapat dipakai sebagai petunjuk yang berguna dalam desain. Menggunakan struktur terdistribusi, seperti rangka ruang, pada kondisi di mana beban terpusat ada, adalah kesalahan yang sering dilakukan oleh perencana yang belum berpengalaman.

Prinsip yang telah disebutkan di atas, bagaimana pun, tidak dapat memecahkan persoalan apabila jenis pembebanan bukan merupakan variabel, dan masalahnya adalah penentuan pilihan antara penggunaan satu elemen struktur besar ataukah beberapa elemen struktur yang lebih kecil. Pada umumnya, penggunaan sedikit elemen yang besar lebih disukai daripada penggunaan banyak elemen kecil untuk memikul beban yang sama. Prinsip ini terutama dapat diterapkan pada situasi desain, misalnya desain kolom atau balok, yang melibatkan manipulasi momen inersia (ingat bahwa momen inersia tidak berbanding lurus dengan dimensi penampang). Pada situasi lain, seperti desain elemen struktur tarik, yang tidak melibatkan momen inersia, prinsip ini tidak dapat diterapkan. Pada situasi terakhir ini tidak ada perbedaan antara kedua cara tersebut.

14.5 PRINSIP-PRINSIP KEBIJAKAN STRUKTURAL

Proses analisis dan desain untuk struktur menengah telah secara implisit disebutkan sebelum ini. Secara garis besar dapat dikatakan bahwa pada struktur menengah, *bagian dari struktur yang paling kaku dan paling dapat menahan gaya akan memikul bagian yang lebih besar dari beban.* Pada analisis balok menerus, misalnya, telah ditunjukkan bahwa pembesaran ukuran penampang di tumpuan (disebut *haunching*) mengandung arti memperbesar momen desain pada bagian tersebut. Momen-momen di lokasi lain menjadi berkurang sehingga ukuran elemen struktur di lokasi tersebut dapat dibuat lebih kecil. Fenomena analog dapat dilakukan pula pada analisis dan desain banyak struktur menengah lainnya (misalnya sederetan kolom paralel atau elemen tarik yang memikul beban atau sistem balok melintang). Telah disebutkan pula sebelum ini bahwa untuk dapat memikul gempa yang lebih besar diperlukan struktur yang lebih kaku.

Fenomena ini, yang kita sebut saja *prinsip kebijakan struktural (principle of structural justice)** dapat digunakan dalam desain. Perencana, sampai taraf tertentu, dapat mengontrol distribusi material dalam ruang untuk mencapai maksud yang dikehendaki. Suatu balok menerus dapat diperbesar ukurannya dan tumpuan, misalnya, untuk memperoleh ruang yang cukup untuk alat-alat mekanis di tengah bentang karena momen desain, jadi juga ukuran penampang, dapat menjadi lebih kecil. Alternatif lain, perencana dapat menggunakan pendekatan yang mengatur variasi kekakuan relatif struktur di berbagai lokasi dengan maksud mengurangi jumlah total material yang diperlukan untuk memikul beban yang diberikan.

Aspek yang menarik dari prinsip ini (yang hanya dapat diterapkan pada struktur statis tak tentu) adalah bahwa momen desain (yang diperoleh sebagai hasil dari analisis) bergantung pada proporsi struktur semula pada saat analisis. Momen yang diperoleh dari analisis ini menentukan ukuran elemen struktur. Ukuran ini harus cocok dengan proporsi yang dipakai untuk analisis. Untuk memperoleh proporsi yang memang benar-benar cocok dengan proporsi semula, memang diperlukan beberapa kali analisis, dan di sinilah diperlukan kebijakan struktural.

14.6 PENGATURAN KONDISI BATAS

Di seluruh bab pada Bagian II yang membahas elemen-elemen khusus, kita telah berulang-ulang membahas lokasi tumpuan, atau kondisi batas, dengan berbagai cara (misalnya membuatnya terjepit). Penentuan lokasi maupun kondisi tumpuan dapat diatur hingga menghasilkan desain struktur yang paling efisien. Di sini tidak akan dibahas secara lebih rinci lagi, hanya akan mengingatkan kembali pembaca akan pentingnya memperhatikan hal tersebut. Kita ingat bahwa prinsip melakukan *segala hal* yang mungkin untuk mengurangi momen lentur yang ada dengan berbagai cara adalah dasar dari proses desain struktur yang efisien. Dengan mengatur lokasi tumpuan, misalnya, momen lentur desain dapat dikurangi sedemikian hingga elemen struktur yang digunakan menjadi sekecil mungkin (lihat Bab 4.3.9 dan 6.4.6). Juga penjepitan ujung elemen struktur atau penggunaan elemen struktur menerus dapat mengurangi momen desain (lihat Bab 8.3 dan 10.3.2). Prinsip umum ini dapat diterapkan pada semua jenis struktur. Prinsip yang menggunakan kontinuitas, misalnya, dapat diterapkan pada balok, plat lipat, cangkang, dan rangka batang untuk mengurangi momen desain sehingga diperoleh struktur yang efisien.

* Istilah demikian, sepanjang pengetahuan pengarang, pertama kali disebutkan oleh E.Traum.

14.7 KENDALA YANG TERLIBAT: PERSYARATAN KEAMANAN TERHADAP KEBAKARAN

Satu hal penting yang juga tidak dapat dilupakan dalam menentukan sistem struktural untuk suatu gedung adalah persyaratan keamanan terhadap kebakaran yang dikehendaki oleh peraturan mengenai gedung. Pada umumnya peraturan itu mengelompokkan gedung atas jenis konstruksi, yang secara kasar adalah ringan, menengah, dan berat, dalam hal derajat ketahanan konstruksinya terhadap kebakaran. Konstruksi ringan umumnya berupa rangka kayu atau rangka logam tak terlindung. Konstruksi menengah umumnya menggunakan dinding bata sebagai elemen pemikul beban. Konstruksi berat umumnya berupa beton bertulang atau rangka baja terlindung.

Peraturan gedung umumnya mengatur penentuan struktur yang dapat digunakan sesuai dengan derajat potensi kebakaran yang ada. Struktur yang mempunyai potensi kebakaran besar memerlukan konstruksi tahan api berat (pada umumnya harus menggunakan struktur beton bertulang atau baja terlindung), sedangkan yang mempunyai sedikit potensi kebakaran dapat menggunakan struktur dengan konstruksi lebih ringan. Jenis konstruksi mempunyai kaitan erat dengan tinggi gedung. Pada gedung rendah, hampir semua jenis konstruksi dapat digunakan kecuali apabila ada potensi kebakaran yang besar. Untuk gedung yang semakin tinggi, konstruksi yang digunakan harus mempunyai keamanan terhadap kebakaran yang lebih tinggi. Gedung yang menggunakan dinding bata pemikul beban umumnya hanya diizinkan untuk digunakan sampai gedung bertingkat lima atau enam. Di atas tinggi ini, struktur beton bertulang atau struktur baja terlindung saja yang dapat digunakan. Perlu diingat bahwa setiap jenis konstruksi yang lebih berat yang dapat digunakan untuk gedung berpotensi kebakaran besar dapat digunakan pada gedung berpotensi kebakaran lebih kecil, tetapi tidak sebaliknya. Sebagai contoh, rumah keluarga satu tingkat dapat menggunakan konstruksi beton bertulang, tetapi gedung perkantoran bertingkat banyak tidak dapat menggunakan rangka kayu. Penggunaan sistem yang lebih berat, sementara sistem yang lebih ringan dapat digunakan, pada umumnya tidak ekonomis.

Selain jenis konstruksi dan tinggi, ada juga pengaturan mengenai luas lantai maksimum yang diizinkan pada gedung, di antara dinding-dinding yang direncanakan khusus untuk membatasi kebakaran. Maksud dinding-dinding ini adalah untuk memisahkan gedung tersebut menjadi komponen-komponen sehingga kebakaran

pada satu komponen tidak segera menjalar ke komponen lainnya. Dalam banyak hal, khususnya pada gedung bertingkat rendah sampai menengah, dinding pemikul beban didesain pula sebagai dinding pemisah kebakaran. Jadi, persyaratan kebakaran mempengaruhi penentuan lokasi dinding pemikul, yang berarti pula mempengaruhi bentang elemen horizontal.

SOAL

14–1. Tunjukkanlah paling sedikit satu gedung bertingkat banyak pada daerah pembaca atau yang ada pada literatur, yang menggunakan dinding-dinding geser untuk memperoleh kestabilan lateral. Gambarlah denah gedung itu, dan tunjukkan secara diagram lokasi dinding-dinding tersebut. Apakah dinding-dinding itu membentuk pola yang dapat menahan beban pada semua arah? Apabila tidak, tunjukkanlah mekanisme pemikul beban lain yang ada untuk menjamin kestabilan lateral.

14–2. Ulangi Soal 14–1 untuk gedung yang menggunakan rangka.

14–3. Ulangi Soal 14–1 untuk gedung yang menggunakan *bracing* diagonal.

14–4. Carilah literatur dan tunjukkanlah paling sedikit enam gedung bertingkat banyak yang mempunyai tinggi berbeda-beda. Tinggi tersebut harus lebih dari 10 tingkat (misalnya Gedung Hancock atau World Trade Center). Tunjukkanlah jenis umum sistem struktural yang digunakan untuk setiap kasus. Gambarlah pada skala yang sama, diagram skematis potongan setiap gedung (yang memperlihatkan dengan jelas elemen-elemen strukturalnya).

14–5. Carilah literatur, dan tunjukkan satu gedung yang telah didesain secara khusus untuk menahan gempa. Tunjukkanlah semua elemen struktural dan nonstruktural beserta hubungannya dalam hal mengurangi pengaruh beban gempa. Catatlah secara diagram hal-hal yang diperoleh.

14–6. Carilah literatur, dan tunjukkanlah satu gedung yang menggunakan "massa peredam" pada lantai teratasnya sebagai cara untuk mengontrol pengaruh beban lateral [tinjaulah, misalnya, Citicorp Center Building di New York *(Architectural Record,* Mid-August, 1976)]. Gambarlah diagram kerja peredam ini.

Bab 15

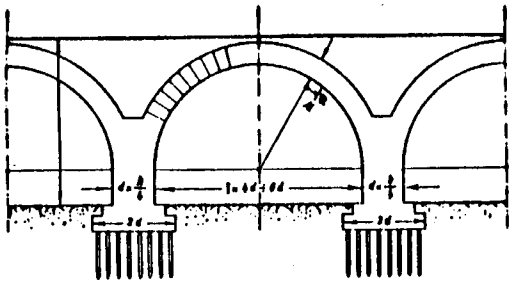
SISTEM STRUKTURAL PENDEKATAN SECARA KONSTRUKSI

15.1 PENDAHULUAN

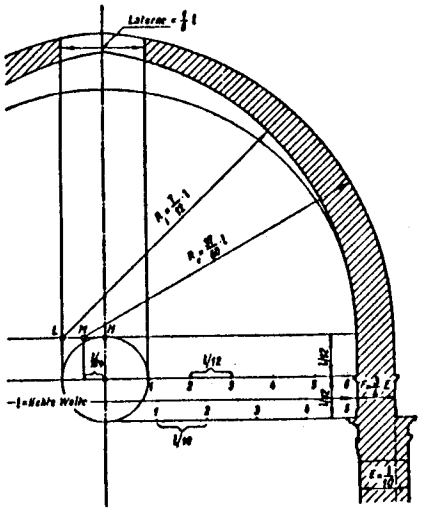
Pada proses desain kita selalu harus melihat secara rinci alternatif-alternatif khusus. Hanya dengan cara demikian kita dapat memahami segala implikasi dari berbagai alternatif, dan membuat pilihan yang rasional mengenai struktur final yang akan digunakan. Pada taraf demikian, perencana berhubungan dengan hal-hal mengenai sistem konstruksi dan material. Perencana harus mempunyai pengetahuan yang luas mengenai pendekatan secara konstruksional.

Bab ini memberikan tinjauan deskriptif secara ringkas mengenai berbagai sistem struktural yang banyak digunakan. Cara yang sangat berguna dalam mengelompokkan sistem tersebut adalah yang didasarkan atas perilaku material yang digunakan pada struktur. Di sini akan dibahas tiga jenis material pokok, yaitu kayu, beton bertulang, dan baja. Maksud bahasan ini adalah untuk memberikan uraian mengenai karakteristik dasar dari berbagai sistem struktural yang dikelompokkan menurut material yang digunakan. Pembaca dianjurkan untuk mempelajari bab-bab sebelum ini mengenai elemen-elemen khusus untuk memperoleh cara-cara analisis dan desain.

Pada bab ini juga diberikan informasi yang dapat dipakai sebagai pedoman sederhana untuk menentukan ukuran elemen. Pedoman tersebut diperoleh secara empiris dari observasi struktur yang pernah dibangun dan telah banyak berhasil dalam memberikan informasi mengenai perencanaan struktur baru. Penggunaan pedoman tersebut adalah cara yang cepat untuk menentukan ukuran awal struktur [lihat Gambar 15–1]. Pada saat ini kita masih dapat menggunakan pedoman itu, tetapi harus secara hati-hati. Karena pedoman-pedoman itu diperoleh dengan meninjau struktur yang telah dibangun sebelumnya, penggunaannya dalam desain



(a) Dimensi jembatan pelengkung menurut Leon Battista Alberti



(b) Penentuan dimensi kupola menurut Carlo Fontana

GAMBAR 15–1 Pedoman di masa silam untuk menentukan ukuran struktur.

cenderung merupakan tinjauan ke masa lampau, bukan tinjauan ke depan, yang berarti juga mengabaikan penemuan baru solusi struktural yang didasarkan atas pengertian dan aplikasi teori struktur yang telah berkembang.

15–2 KONSTRUKSI KAYU

Sistem Utama. Hampir semua sistem struktural yang menggunakan kayu sebagai material dasar dapat dikelompokkan ke dalam elemen linear yang membentang dua arah. Susunan hierarki sistem struktur ini khas. Pada Gambar 15–2 diperlihatkan contoh berbagai jenis sistem konstruksi kayu yang umum digunakan. Tentu saja kita masih mungkin membuat sistem struktural yang berbeda dengan yang digambarkan itu.

Rangka Ringan. Sistem struktur *joist* **ringan pada Gambar 15–2(a) adalah konstruksi kayu yang paling** banyak digunakan pada saat ini. Sistem *joist* lantai **terutama sangat** berguna untuk beban hidup ringan yang terdistribusi merata dan **untuk bentang yang** tidak besar. Kondisi demikian umumnya dijumpai pada konstruksi rumah. *Joists* pada umumnya menggunakan tumpuan sederhana karena untuk membuat tumpuan yang dapat menahan momen diperlukan konstruksi khusus. Pada umumnya, lantai dianggap tidak monolit dengan *joists* kecuali apabila digunakan konstruksi khusus yang menyatukannya.

Sistem tumpuan vertikal yang umum digunakan adalah dinding pemikul beban yang dapat terbuat dari bata atau dari susunan elemen kayu (plywood). Dalam hal yang terakhir ini, tahanan lateral pada susunan struktur secara keseluruhan terhadap beban horizontal diperoleh dengan menyusun dinding berlapisan *plywood* yang berfungsi sebagai bidang-bidang geser. Struktur demikian pada umumnya dibatasi hanya sampai tiga atau empat lantai. Pembatasan ini tidak hanya karena alasan kapasitas pikul bebannya, tetapi juga karena persyaratan keamanan terhadap kebakaran yang umum diberikan pada peraturan-peraturan mengenai gedung.

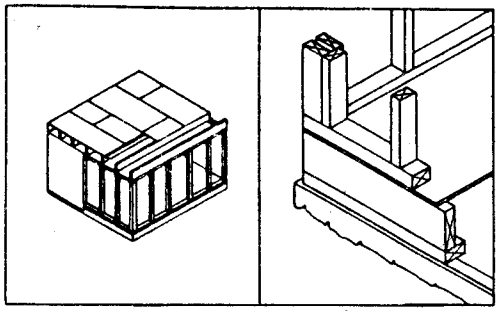
Karena setiap elemen pada sistem struktur ini diletakkan di tempatnya secara individual, maka kita mempunyai banyak fleksibilitas dalam penggunaan sistem itu, juga dalam merencanakan hubungan di antara elemen-elemen tersebut.

Elemen Kulit Bertegangan (Stressed Skin Elements). *Elemen kulit bertegangan* tentu saja berkaitan dengan sistem *joists* standar [lihat Gambar 15–2(b)]. Pada elemen-elemen ini, *plywood* disatukan dengan balok memanjang sehingga sistem ini dapat berlaku secara integral dalam molekul lentur. Dengan demikian, sistem yang diperoleh akan bersifat sebagai plat.

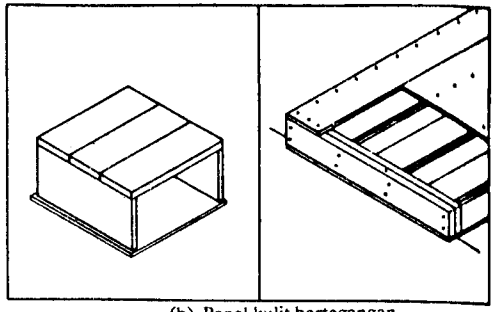
Kekakuan sistem ini juga meningkat karena adanya penyatuan tersebut. Dengan demikian, tinggi struktural akan lebih kecil dibandingkan dengan sistem *joists* standar. Elemen kulit bertegangan ini pada umumnya dibuat tidak di lokasi, dan dibawa ke lokasi sebagai modul-modul. Kegunaannya akan semakin meningkat apabila modul-modul ini dapat dipakai secara berulang. Elemen demikian dapat digunakan pada berbagai struktur, termasuk juga sistem plat lipat berbentang besar.

Balok Boks. Perilaku yang diberikan oleh balok boks dari *plywood* [lihat Gambar 15–2(c)] memungkinkan penggunaannya untuk berbagai ukuran bentang dan kondisi pembebanan. Sistem demikian sangat berguna pada situasi bentang-besar atau apabila ada kondisi beban yang khusus. Balok boks dapat secara efisien mempunyai bentang lebih besar daripada balok homogen maupun balok berlapis.

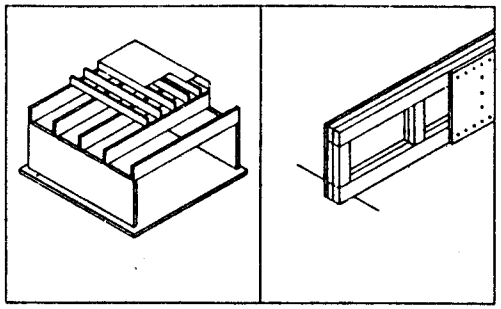
Konstruksi Kayu Berat. Sebelum sistem *joist* ringan banyak digunakan, orang telah banyak menggunakan balok kayu berat dengan papan transversal [lihat Gambar 15–2(e)]. Balok kayu berlapisan sekarang banyak digunakan sebagai alternatif dari balok homogen. Sistem demikian dapat mempunyai kapasitas pikul beban dan bentang lebih besar daripada sistem *joist*. Sebagai contoh, dengan balok berlapisan, bentang yang relatif besar adalah mungkin karena tinggi elemen struktur dapat dengan mudah kita peroleh dengan menambah lapisan. Elemen demikian umumnya



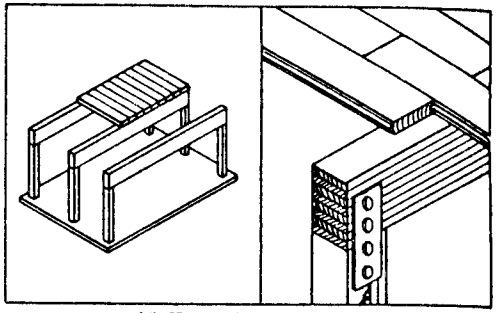
(a) Konstruksi rangka ringan



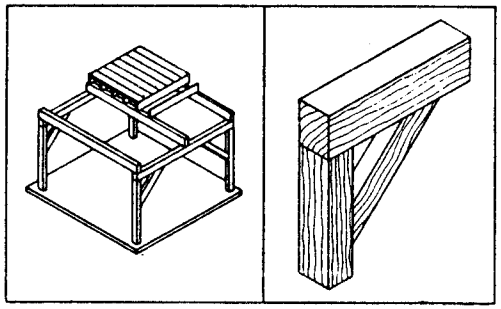
(b) Panel kulit bertegangan



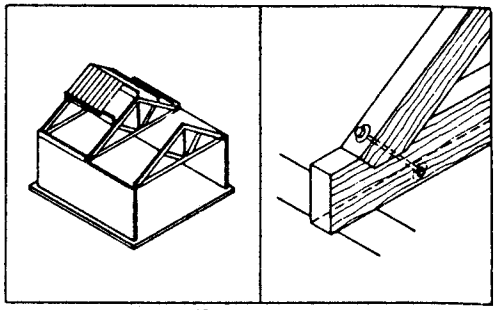
(c) Balok boks



(d) Konstruksi kayu berat: balok berlapis

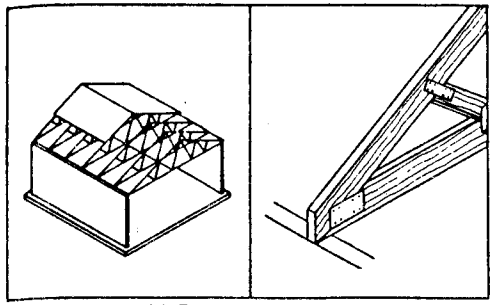


(e) Konstruksi kayu berat: rangka berpengaku

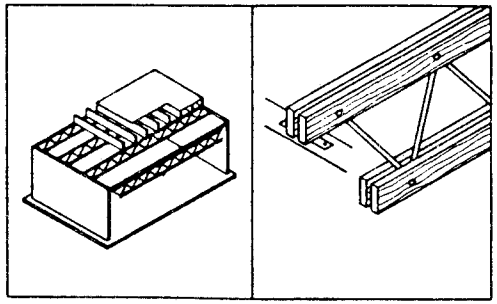


(f) Rangka batang desain khusus

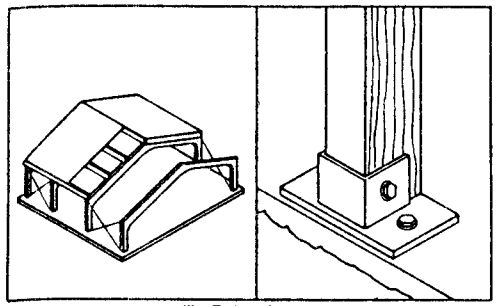
GAMBAR 15–2 Sistem konstruksi kayu.



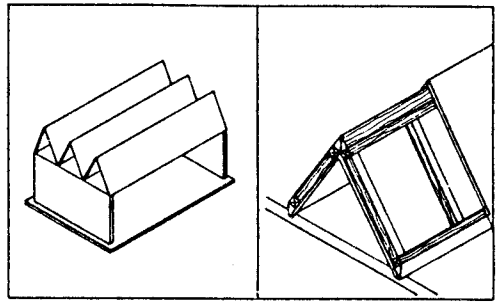
(g) Rangka batang: "*trussed rafters*" yang diproduksi besar-besaran untuk rumah



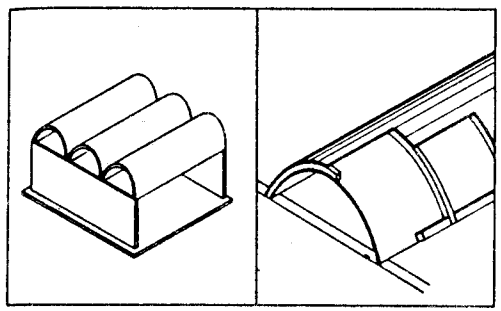
(h) Rangka batang joist web terbuka yang diproduksi besar-besaran



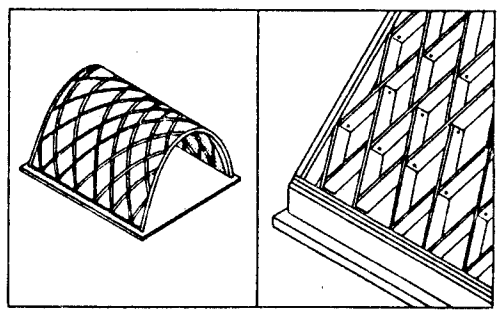
(i) Pelengkung: elemen kayu berlapisan



(j) Plat lipat



(k) Panel pelengkung)



(l) Konstruksi *lamella*

Gambar 15-2 (lanjutan)

bertumpuan sederhana, tetapi kita dapat juga memperoleh tumpuan yang mampu memikul momen dengan menggunakan konstruksi khusus.

Sistem penumpu vertikal pada struktur ini umumnya berupa dinding bata atau kolom kayu. Tahanan terhadap beban lateral pada struktur ini umumnya diperoleh dengan menggunakan dinding tersebut sebagai bidang geser. Apabila bukan dinding, melainkan kolom yang digunakan, pengekang (bracing) dapat pula digunakan untuk meningkatkan kestabilan struktur terhadap beban lateral. Peningkatan kestabilan dengan menggunakan titik hubung kaku dapat saja digunakan untuk struktur rendah, tetapi hal ini jarang dilakukan.

Rangka Batang. Rangka batang kayu merupakan sistem berbentang satu arah yang paling banyak digunakan karena kita dapat dengan mudah menggunakan banyak variasi dalam konfigurasi dan ukuran batang. Rangka batang yang dibuat tidak secara besar-besaran dapat dibuat khususnya untuk kondisi beban dan bentang tertentu. Sekalipun demikian, kita dapat juga membuat rangka batang secara besar-besaran (mass production). Rangka batang demikian umumnya digunakan pada situasi bentang tidak besar dan beban ringan. Rangka batang *trussed rafter* pada Gambar 15–2(g), misalnya, banyak digunakan sebagai konstruksi atap pada bangunan rumah. Sistem yang terlihat pada Gambar 15–2(b) analog dengan balok baja *web terbuka* dan berguna untuk situasi bentang besar (khususnya untuk atap).

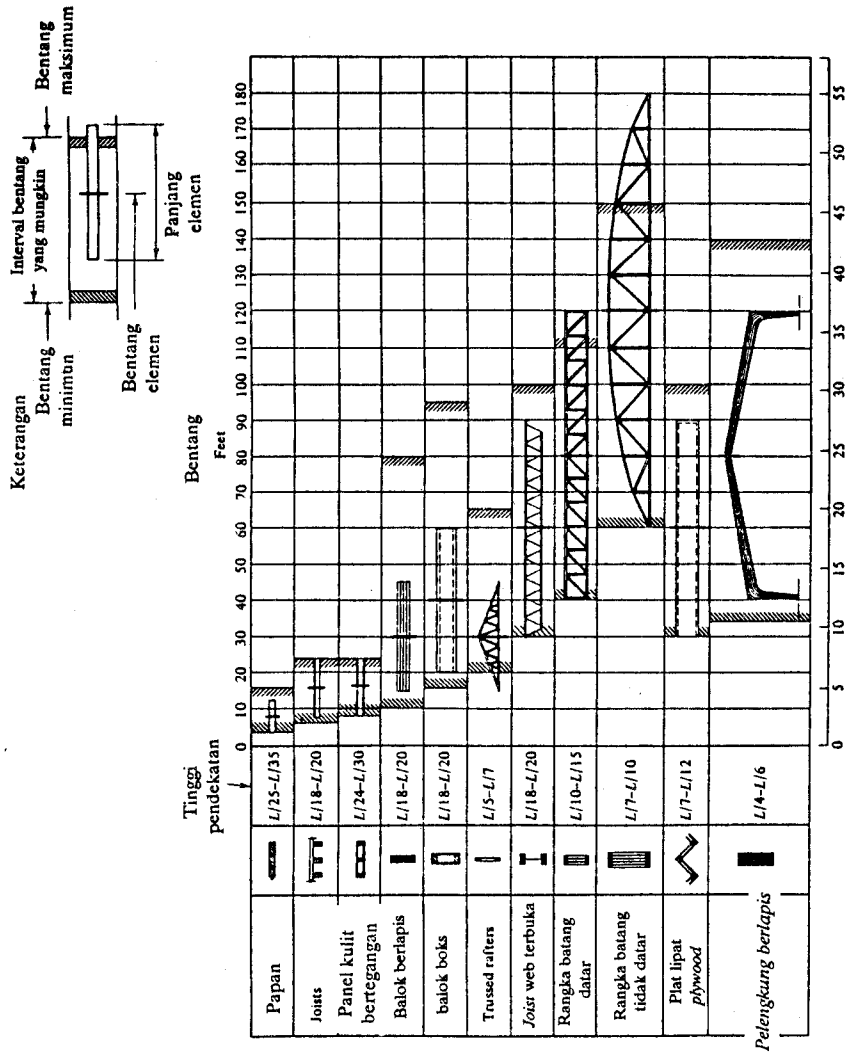
Plat Lipat dan Panel Pelengkung. Banyak struktur plat lengkung atau plat datar yang umumnya berupa elemen berbentang satu, yang dapat dibuat dari kayu. Kebanyakan struktur tersebut menggunakan *plywood.* Gambar 15–2(j) dan (k) mengilustrasikan dua contoh struktur itu.

Lamella. Konstruksi *lamella* merupakan cara untuk membuat permukaan lengkung tunggal atau ganda dari potongan-potongan kecil kayu [lihat Gambar 15–2(l)] Konstruksi yang menarik ini dapat digunakan untuk membuat permukaan silindris berbentang besar, juga struktur kubah. Sistem ini sangat banyak digunakan, terutama pada struktur atap.

Ukuran Elemen Struktur. Gambar 15–3 mengilustrasikan kira-kira batas-batas bentang untuk berbagai jenis struktur kayu. Seperti telah disebutkan terdahulu, bentang "maksimum" yang diperlihatkan pada diagram ini bukanlah bentang maksimum yang mungkin, melainkan batas bentang terbesar yang umum dijumpai. Batasan bentang minimum menunjukkan bentang terkecil yang masih ekonomis.

Gambar itu juga memperlihatkan kira-kira batas-batas tinggi untuk berbagai bentang setiap sistem. Angka yang kecil menunjukkan tinggi mininum yang umum untuk sistem yang bersangkutan dan angka lainnya menunjukkan tinggi maksimumnya. Tinggi sekitar $L/20$, misalnya, mengandung arti bahwa elemen struktur yang bentangnya 16 ft (4,9 m) harus mempunyai tinggi sekitar 16 ft/20 = 0,8 ft (0,24 m).

Kolom kayu pada umumnya mempunyai perbandingan tebal terhadap tinggi (t/h) bervariasi antara 1 : 25 untuk kolom yang dibebani tidak besar dan relatif pendek dan sekitar 1 : 10 untuk kolom yang dibebani besar pada gedung bertingkat.



Gambar 15-3 Pendekatan batas-batas bentang untuk sistem konstruksi kayu. Agar elemen struktur kayu yang berbeda-beda dapat dengan mudah dibandingkan, diagram dibuat berskala sehingga dapat menunjukkan panjang bentang untuk setiap elemen. Panjang bentang yang secara aktual mungkin untuk setiap elemen disebut sebagai batas "maksimum" dan "minimum".

Dinding yang dibuat dari elemen-elemen kayu mempunyai perbandingan t/h bervariasi dari 1 : 30 sampai 1 : 15.

Tabel-tabel yang memberikan informasi seperti terlihat pada Gambar 15–3 dan informasi tentang perbandingan t/h harus secara hati-hati digunakan, dan tidak dapat dijadikan satu-satunya cara untuk menentukan ukuran elemen struktur. Informasi sederhana seperti tersebut di atas hanya dapat digunakan untuk mendapat *feeling* dalam mencari hubungan antara sistem, bentang, dan tinggi saja.

15–3 KONSTRUKSI BETON BERTULANG

Sistem Utama. Beton bertulang adalah material yang sangat banyak digunakan dan selalu merupakan jenis elemen struktural kaku. Gambar 15–4 mengilustrasikan beberapa sistem struktur beton bertulang yang umum digunakan.

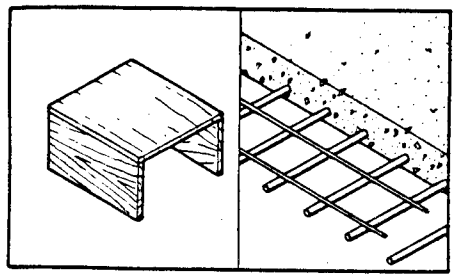
Slab dan Balok. Di antara semua sistem beton bertulang, yang paling sederhana adalah *slab* satu arah konvensional [Gambar 15–4(a)]. Salah satu keuntungan sistem demikian adalah mudahnya pelaksanaannya. Sistem dengan tinggi konstan ini khususnya cocok untuk bentang kecil. Untuk bentang besar, berat sendiri *slab* menjadi sangat besar sehingga akan lebih efisien kalau menggunakan *slab* ber-*rib* [Gambar 15–4(b)].

Sistem balok satu arah dengan slab satu arah melintang dapat digunakan untuk bentang yang relatif panjang [khususnya apabila balok tersebut *post-tensioned*] dan memikul bentang besar. Sistem demikian biasanya tinggi. Jarak balok biasanya ditentukan berdasarkan kebutuhan untuk menumpu *slab* melintang.

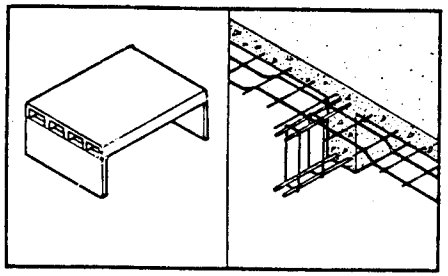
Sistem Joist Pan Satu Bentang. Sistem *joist* pan satu bentang adalah *slab* ber-*rib* yang dibuat dengan mengecor (menuang) beton pada perancah baja atau *fiberglass* berbentuk khusus [lihat Gambar 15–4(c)]. Balok transversal (melintang) dengan berbagai tinggi dapat dengan mudah dicor di tempat sehingga pada sistem ini pola denah kolom dapat sangat bervariasi. Balok longitudinal (memanjang) juga dapat dengan mudah dicor di tempat, yaitu dengan mengatur jarak pan. *Slab* ber-*rib* ini dapat mempunyai bentang lebih besar dibandingkan dengan *slab* masif, terlebih lagi kalau *slab* ber-*rib* itu diberi *pasca tegangan (post-tensioned).* Penumpu vertikal pada sistem ini dapat berupa kolom-kolom atau dinding bata pemikul beban.

Sistem kolom dan *slab* ber-*rib* mempunyai kemampuan besar dalam memikul beban horizontal karena balok longitudinal maupun transversal dicor secara monolit dengan sistem lantai. Dengan demikian, aksi rangka (frame action) akan diperoleh pada kedua arah (transversal dan longitudinal).

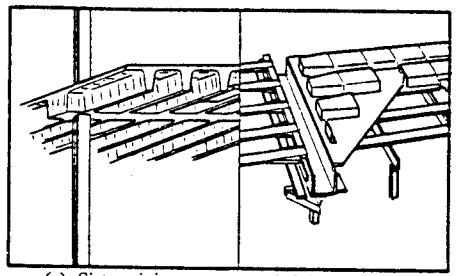
Konstruksi Plat Datar (Flat-Plate Construction). Plat datar adalah sistem *slab* beton bertulang dua arah bertinggi konstan [lihat Gambar 15–4(d)]. Konstruksi ini cocok digunakan untuk beban atap dan lantai ringan dan bentang relatif pendek. Sistem demikian banyak digunakan pada konstruksi rumah. Meskipun sistem demikian lebih cocok digunakan dengan pola kolom teratur, kita dapat saja membuat pola kolom tidak teratur. Memang, plat datar sering digunakan apabila ortogonalitas kaku yang



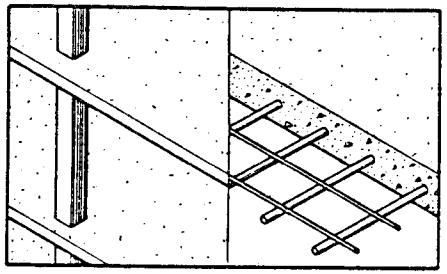
(a) Plat datar satu arah (dicor di tempat)



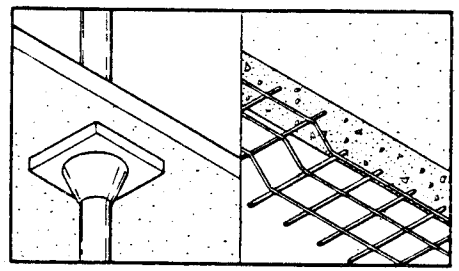
(b) Sistem *slab* dan balok satu arah (dicor di tempat)



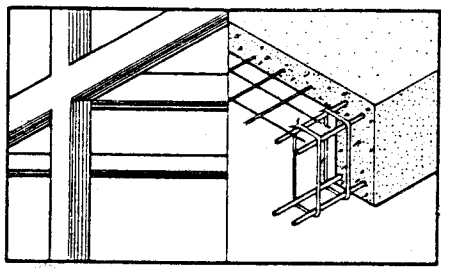
(c) Sistem *joist* pan satu arah (dicor di tempat)



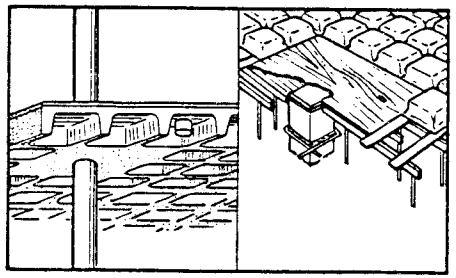
(d) Plat datar dua arah (dicor di tempat)



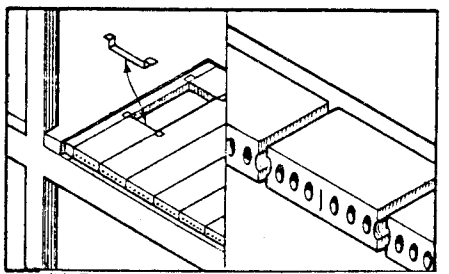
(e) *Slab* datar dua arah (dicor di tempat)



(f) *Slab* dan balok dua arah (dicor di tempat)

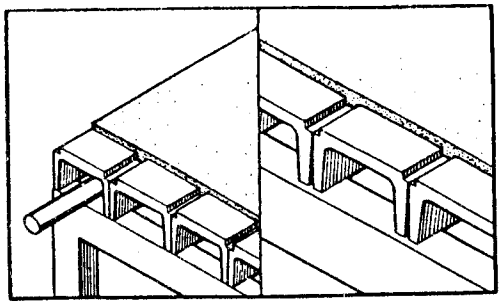


(g) *Slab* wafel dua arah (dicor di tempat)

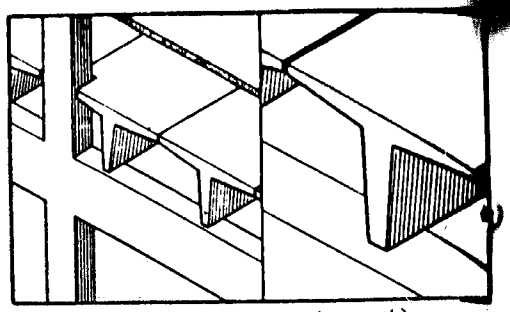


(h) Papan beton prategang bentang panjang (pracetak)

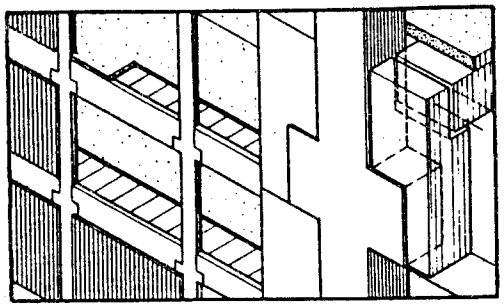
GAMBAR 15–4 Beberapa sistem konstruksi beton bertulang.



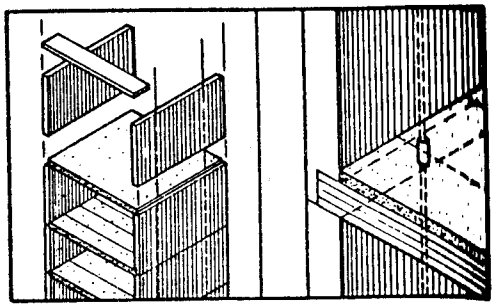
(i) Kanal prategang (pracetak)



(j) T tunggal prategang (pracetak)



(k) Sistem kolom dan balok (pracetak)



(l) Sistem rumah (dinding dan papan pracetak diberi pascatarik bersama-sama)

Gambar 15-4 (lanjutan)

disyaratkan pada banyak sistem lain terhadap pola tumpuan vertikal tidak dikehendaki atau tidak mungkin dilaksanakan. Akan tetapi, pada konstruksi *flat-plate* ini bentangnya tidak dapat sebesar sistem yang menggunakan balok maupun yang menggunakan *rib.*

Dengan konstruksi plat datar ini kita dapat memperoleh jarak plafon ke lantai yang lebih kecil daripada sistem-sistem lainnya. Akan tetapi, pada sistem plat datar ini diperlukan tulangan baja lebih banyak sebagai akibat tipisnya plat yang digunakan. Faktor desain yang menentukan pada plat datar pada umumnya adalah geser pons pada plat di pertemuan dengan kolom. Dengan demikian, untuk mengatasinya di daerah ini diperlukan tulangan khusus. Selain itu, kolom yang terletak di tepi plat biasanya diletakkan agak ke dalam untuk menjamin bahwa luas kritis pons tetap besar (lihat Bab 10).

Kestabilan lateral untuk keseluruhan susunan plat dan kolom juga perlu diperhatikan. Karena plat dan kolom dicor secara monolit, titik hubungnya relatif kaku sehingga memberi kontribusi pada tahanan lateral struktur, dan hal ini sudah cukup untuk gedung bertingkat rendah. Akan tetapi, karena tipisnya elemen plat, tahanan ini sangat terbatas. Untuk struktur bertingkat tinggi, kestabilan terhadap beban lateral baru terpenuhi dengan menggunakan dinding geser atau elemen inti yang dicor di tempat pada gedung, yang biasanya terdapat di sekitar elevator (lift) atau di sekitar tangga.

Pada sistem ini, keuntungan lain yang dapat diperoleh adalah mudahnya membuat perancah. Perilaku planar pada permukaan bawah juga memudahkan desain dan penempatan komponen gedung lainnya. Sistem ini sering digunakan pada gedung apartemen dan asrama yang umumnya membutuhkan ruang fungsi tidak besar, tetapi banyak.

Konstruksi Slab Datar. Slab datar adalah sistem beton bertulang dua arah yang hampir sama dengan plat datar, hanya berbeda dalam hal luas kontak antara plat dan kolom yang diperbesar dengan menggunakan *drop pannels* dan atau kepala kolom (column capitals) [lihat Gambar 15–4(e)]. *Drop panels* atau kepala kolom itu berfungsi mengurangi kemungkinan terjadinya keruntuhan geser pons [lihat Bab 10]. Sistem demikian khususnya cocok untuk kondisi pembebanan relatif berat (misalnya untuk gudang), dan cocok untuk bentang yang lebih besar daripada bentang plat datar.

Adanya *drop panels* dan kepala kolom juga memberikan kontribusi dalam memperbesar tahanan sistem *slab* - dan - *kolom terhadap beban lateral.*

Konstruksi Slab dan Balok Dua Arah. Sistem slab dan balok dua arah terdiri atas plat dengan balok beton bertulang yang dicor di tempat secara monolit, dan balok tersebut terdapat di sekeliling plat [lihat Gambar 15–4(f)]. Sistem ini baik untuk kondisi beban besar dan bentang menengah. Beban terpusat besar juga dapat dipikul apabila bekerja langsung di atas balok. Pada sistem ini selalu digunakan kolom sebagai penumpu vertikal. Karena balok dan kolom dicor secara monolit, sistem ini secara alami akan membentuk rangka pada dua arah. Hal ini sangat meningkatkan kapasitas pikul beban lateral sehingga sistem demikian banyak digunakan pada gedung bertingkat banyak.

Slab Wafel. *Slab* wafel (*waffle slab*) adalah sistem beton bertulang dua arah bertinggi konstan yang mempunyai *rib* dalam dua arah [lihat Gambar 15–4(g)]. *Rib* ini dibentuk oleh pan khusus yang terbuat dari baja atau *fibreglass.* Rongga yang dibentuk oleh rib sangat mengurangi berat sendiri struktur. Untuk situasi bentang besar, *slab* wafel lebih menguntungkan dibandingkan dengan plat datar (flat-plate). *Slab* wafel juga dapat diberi pasca tarik untuk digunakan pada bentang besar.

Di sekitar kolom, *slab* biasanya dibiarkan tetap tebal (jadi tidak menggunakan pan pada lokasi tersebut). Daerah yang kaku ini berfungsi sama dengan *drop panels* atau kepala kolom pada *slab* datar. Dengan demikian, kemungkinan terjadinya keruntuhan geser pons akan berkurang, dan kapasitas tahanan momen sistem ini akan meningkat (demikian pula kapasitas pikul bebannya).

Baik bentang maupun kapasitas pikul beban lateral pada sistem wafel dapat dibesarkan dengan mengecor balok di lokasi, antara kolom-kolom. Hal ini dapat dilakukan secara mudah dengan cara tidak menggunakan pan di sepanjang garis balok tersebut (atau dengan membuat jarak pan yang berjauhan), dengan menambah tulangan secukupnya, dan mengecor beton pada tinggi penuh (lihat Bab 10).

Bentuk Lengkung. Setiap bentuk lengkung tunggal maupun ganda (silinder, kubah, dan sebagainya) selalu dapat dibuat dari beton bertulang. Pada umumnya di dalam

cangkang beton terdapat jaring tulangan baja ringan. Biasanya pada lokasi yang mengalami gaya internal besar, tulangan itu semakin banyak. Pemberian pasca tarik pada umumnya dilakukan untuk elemen-elemen khusus (misalnya cincin tarik pada kubah; lihat Bab 12).

Elemen Beton Pracetak. Elemen beton pracetak dibuat tidak di lokasi bangunan, dan harus diangkut ke lokasi apabila akan digunakan. Elemen ini umumnya berupa elemen yang membentang satu arah, yang pada umumnya diberi pra tarik (lihat Bab 6.4.7). Banyak bentuk penampang melintang yang dapat dibuat untuk berbagai kondisi bentang dan beban. Hampir selalu elemen ini digunakan untuk beban berguna (pada lantau maupun atap) yang terdistribusi merata dan tidak untuk beban terpusat atau beban terdistribusi yang sangat besar. Elemen struktur pracetak ini hapir selalu ditunmpu sederhana.

Hubungan yang mampu memikul momen dapat diperoleh dengan menggunakan konstruksi khusus, tetapi hal ini umumnya sulit dilakukan. Dengan demikian, penggunaan elemen ini sebagai kantilever besar juga sulit. Penggunaan elemen pracetak akan sangat terasa untuk bagian yang berulang. Beberapa jenis elemen pracetak yang berbeda dibahas berikut ini (jenis-jenis lainnya tidak dibahas di sini).

Papan Beton Pracetak. Papan beton pracetak berbentang pendek maupun panjang dapat dibuat. Plat bentang pendek mempunyai bentang sedikit lebih besar daripada papan kayu. Biasanya di atas papan beton pracetak ini ada permukaan beton yang dicor di tempat (wearing surface). Permukaan ini memang biasanya digunakan di atas balok beton bertulang pracetak atau *joist* web terbuka. Papan beton bentang besar dapat mempunyai bentang antara 16 dan 34 ft (5 dan 11 m), bergantung pada lebar dan tinggi eksak elemen. Papan beton bentang besar ini umumnya diberi prategang dan juga diberi rongga untuk mengurangi berat dirinya. Beton yang dicor di tempat di atas papan pracetak mempunyai fungsi sebagai penghubung geser antara elemen-elemen yang dihubungkannya sehingga struktur ini dapat berperilaku sebagai plat satu arah [lihat Gambar 15–4(h)]. Papan beton umumnya cocok digunakan untuk memikul beban atap atau beban lantai yang tidak besar. Papan beton pracetak selalu ditumpu sederhana dan sering kali digunakan bersama dinding pemikul beban sebagai sistem penumpu vertikalnya (dinding ini harus terbuat dari bata atau beton, bukan kayu). Papan tersebut juga dapat digunakan bersama balok beton bertulang maupun balok baja.

T Rangkap dan Kanal. Ada elemen prategang, pracetak, satu arah, yang ber-*rib* yang dapat digunakan untuk bentang panjang [Gambar 15–4(i)]. Jenis elemen ini biasa digunakan untuk beban mati dan hidup pada atap. Di atas elemen ini biasanya digunakan beton yang dicor di tempat sebagai *wearing surface,* juga sebagai penghubung dengan elemen T lain di dekatnya.

T Tunggal. Ada elemen prategang, pracetak, dan besar yang umumnya mempunyai bentang relatif panjang. Elemen demikian sangat jarang digunakan untuk situasi bentang kecil karena sulitnya melaksanakan ereksi. Elemen ini selalu ditumpu sederhana. Elemen ini dapat digunakan untuk beban yang relatif besar. Sebagai contoh, elemen ini dapat digunakan untuk garasi dan gedung lain yang mempunyai bentang besar dan beban yang lebih besar dari beban biasa [Gambar 15–4(j)].

Sistem Gedung Khusus. Kita dapat menyatukan sejumlah sistem yang secara lengkap membentuk suatu gedung [Gambar 15–4(1)]. Sistem-sistem yang dirancang secara khusus untuk konstruksi rumah ini umum dilakukan. Pendekatan yang digunakan biasanya dapat dimasukkan ke dalam dua kelompok: (1) sistem-sistem yang mempunyai elemen planar atau linear (yang diproduksi tidak di lokasi), seperti dinding atau sistem lain yang membentang secara horizontal yang kemudian digabungkan di lokasi (biasanya dengan sistem pascatarik) sehingga membentuk suatu volume; dan (2) sistem-sistem yang sudah membentuk volume di luar lokasi yang kemudian diangkut ke lokasi.

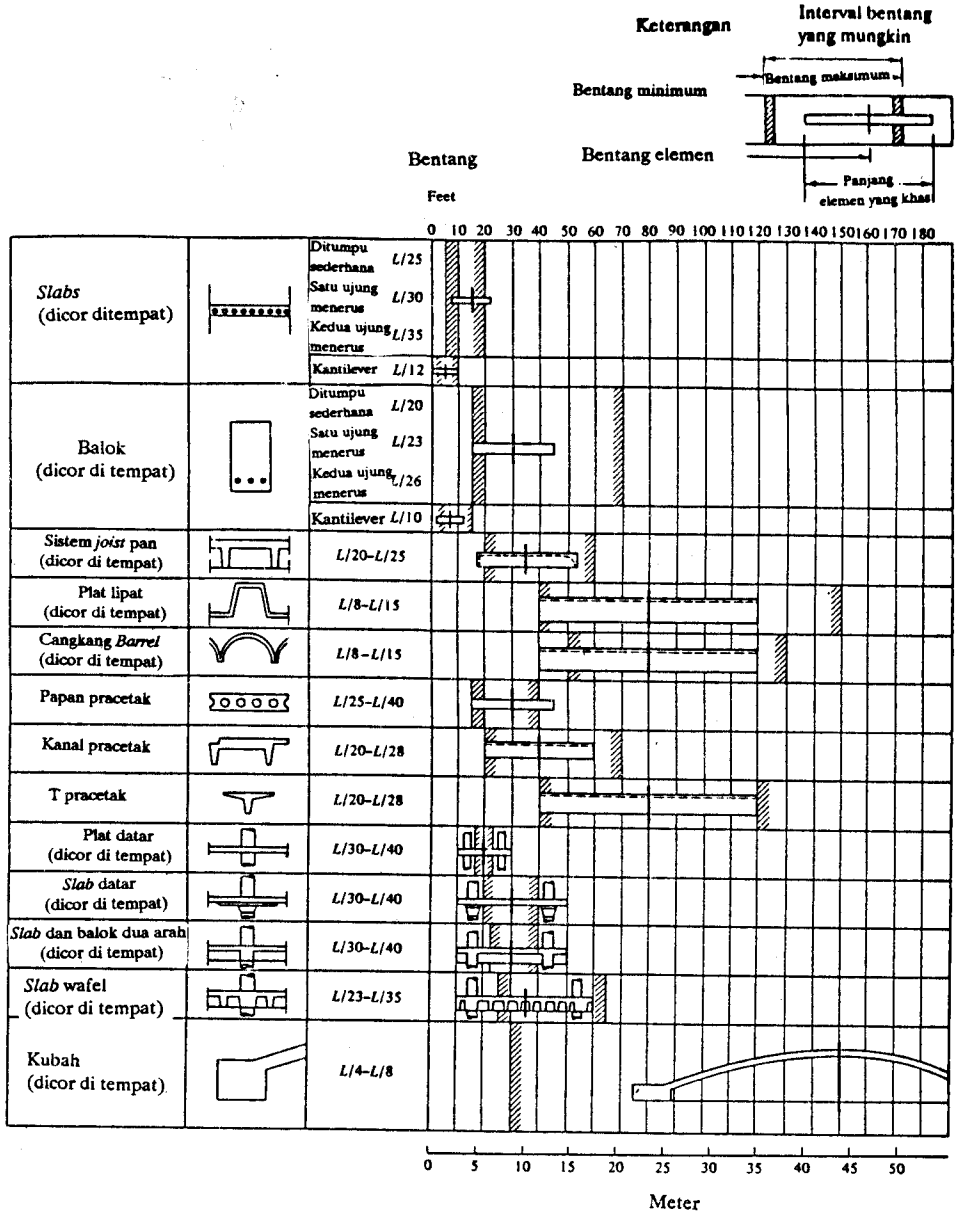
Ukuran Elemen Struktur. Gambar 15–5 mengilustrasikan batas-batas bentang dan tinggi khas untuk beberapa sistem beton bertulang. Kolom beton bertulang umumnya mempunyai perbandingan tebal-tinggi (t/h) bervariasi dari 1 : 15 untuk kolom pendek dan dibebani ringan hingga sekitar 1 : 6 untuk kolom yang dibebani besar pada gedung bertingkat banyak. Dinding beton bertulang pemikul beban mempunyai perbandingan t/h bervariasi antara 1 : 22 dan 1 : 10.

15.4 KONSTRUKSI BAJA

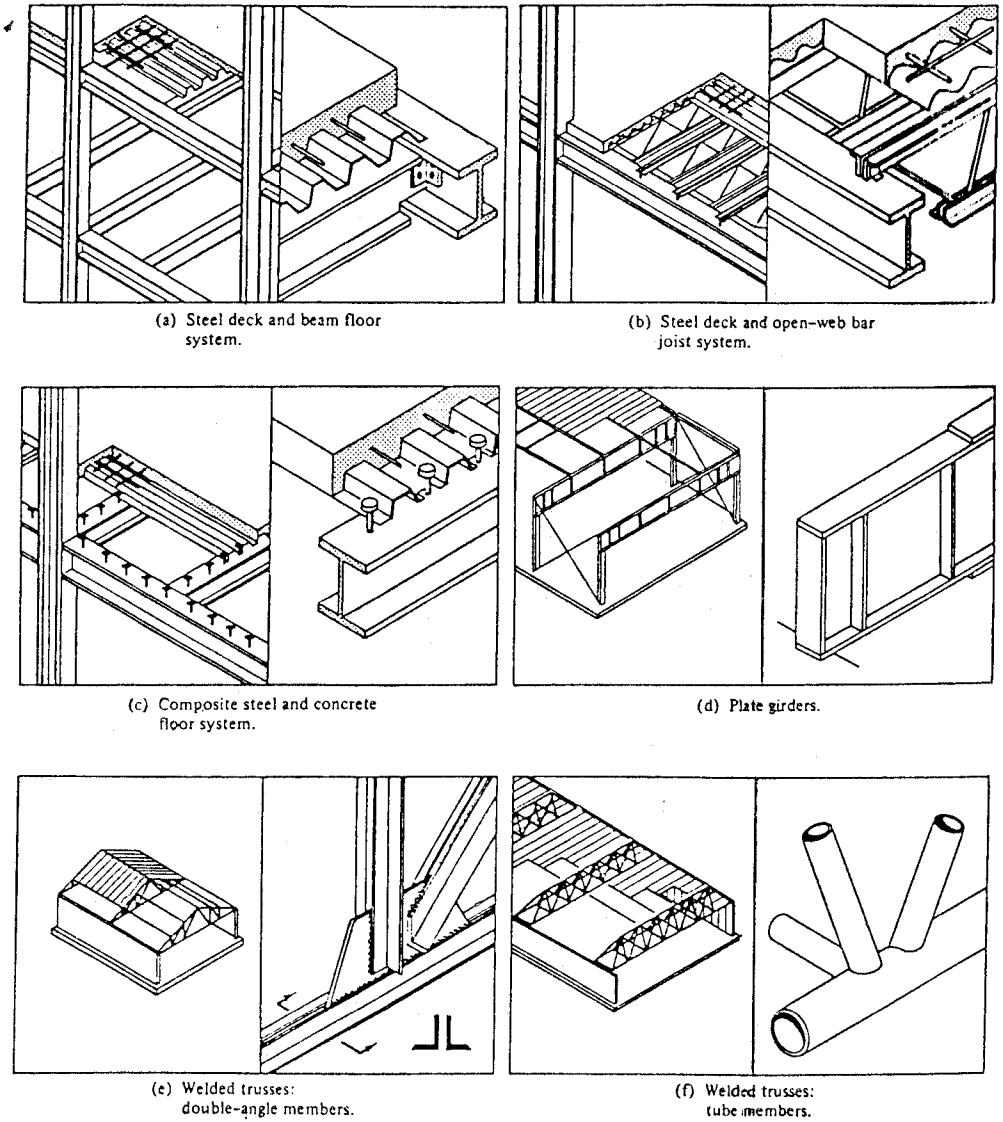
Sistem Utama. Hampir semua sistem konstruksi baja berat terbuat dari elemen-elemen linear yang membentang satu arah. Berbagai penampang baja gilas (flens lebar) yang tersedia dalam berbagai ukuran dapat digunakan. Banyaknya ukuran penampang ini memungkinkan fleksibilitas dalam desain elemen balok-dan-kolom. Meskipun hubungan sederhana (sendi) umumnya digunakan pada sistem ini, kita dapat dengan mudah membuat titik hubung yang mampu memikul momen. Struktur rangka yang titik-titik hubungnya mampu memikul momen, mempunyai tahanan terhadap beban lateral cukup besar. Kestabilan lateral juga dapat ditingkatkan dengan menggunakan dinding geser atau elemen pengekang (bracing) diagonal.

Balok. Bentuk sayap lebar biasanya digunakan sebagai elemen yang membentang secara horizontal [lihat Gambar 15–6(a)]. Interval bentang yang mungkin untuk elemen ini sangat lebar. Elemen ini biasanya ditumpu sederhana kecuali apabila aksi rangka (frame action) diperlukan untuk menjamin stabilitas, di mana hubungan yang mampu memikul momen digunakan. Bentuk-bentuk lain, seperti kanal, kadang-kadang digunakan untuk memikul momen, tetapi biasanya terbatas pada beban ringan dan bentang pendek.

Girder Plat. *Girder* plat (plate girders) adalah bentuk khusus dari balok. Karena merupakan penampang tersusun [lihat Gambar 15–6(d)]., kita dapat merancangnya untuk berbagai besar beban maupun bentang yang dibutuhkan. Elemen struktur ini sangat berguna apabila beban yang sangat besar harus dipikul oleh bentang me-



Gambar 15-5 Pendekatan batas-batas bentang untuk sistem beton bertulang. Untuk memudahkan dalam membandingkan ukuran khas berbagai elemen struktur, panjang bentang khas untuk setiap elemen digambar secara berskala. Panjang bentang yang secara aktual mungkin digunakan untuk setiap elemen disebut sebagai bentang "maksimum" dan "minimum".



(a) Steel deck and beam floor system.

(b) Steel deck and open-web bar joist system.

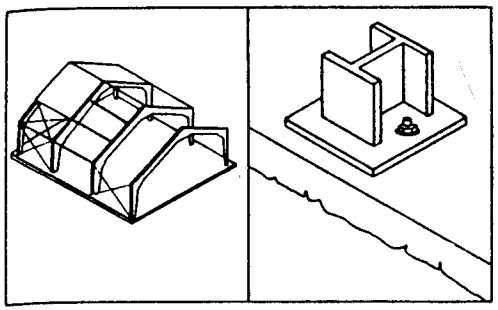
(c) Composite steel and concrete floor system.

(d) Plate girders.

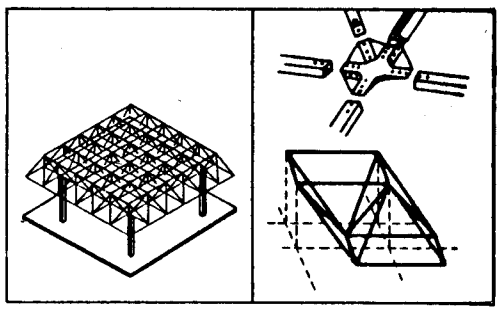
(e) Welded trusses: double-angle members.

(f) Welded trusses: tube members.

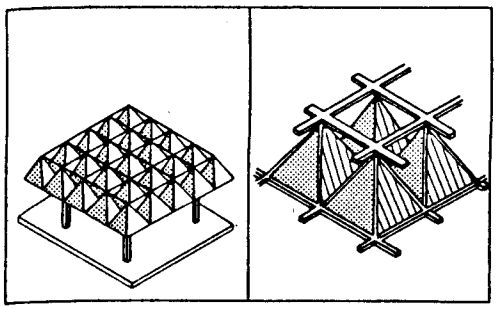
Gambar 15-6 Konstruksi baja



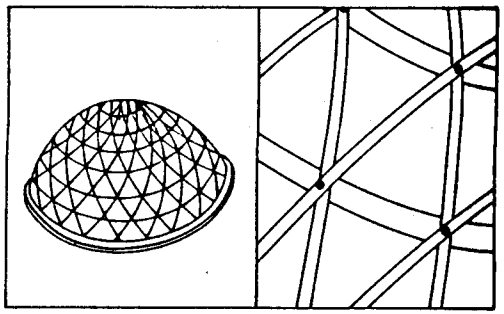
(g) Pelengkung



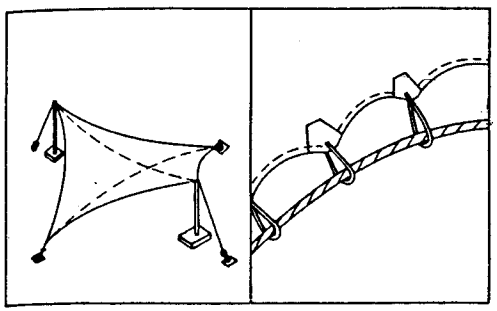
(h) Rangka ruang



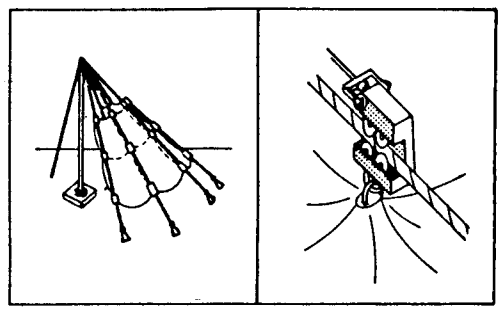
(i) Rangka ruang kulit bertegangan



(j) Kubah ber-*rib*



(k) Struktur membran prategang



(j) Struktur kabel atap lipat

GAMBAR 15-6 (lanjutan)

nengah. Elemen ini sering digunakan, misalnya sebagai elemen penyalur beban utama yang memikul beban kolom pada bentang bersih. Elemen ini jarang digunakan untuk beban lantai yang umumnya terdistribusi dan bentang yang biasa karena untuk ini akan lebih ekonomis apabila digunakan elemen sayap lebar.

Konstruksi Komposit. Banyak sistem struktural yang tidak dapat dikelompokkan secara mudah menurut material yang digunakan. Sistem balok komposit seperti terlihat pada Gambar 15–6(c) sering kita jumpai. Dalam hal ini, baja adalah bagian yang diletakkan pertama kali, kemudian beton dicor di sekitar penghubung geser (*shear connectors*) di atas balok baja. Adanya penghubung geser tersebut menyebabkan balok baja dan beton di atasnya bekerja secara integral. Dengan demikian terbentuk penampang T dengan baja sebagai bagian yang mengalami tarik, dan beton yang mengalami tekan. Apabila kita menggunakan dek *wearing surface*, maka cara ini akan menjadi lebih ekonomis.

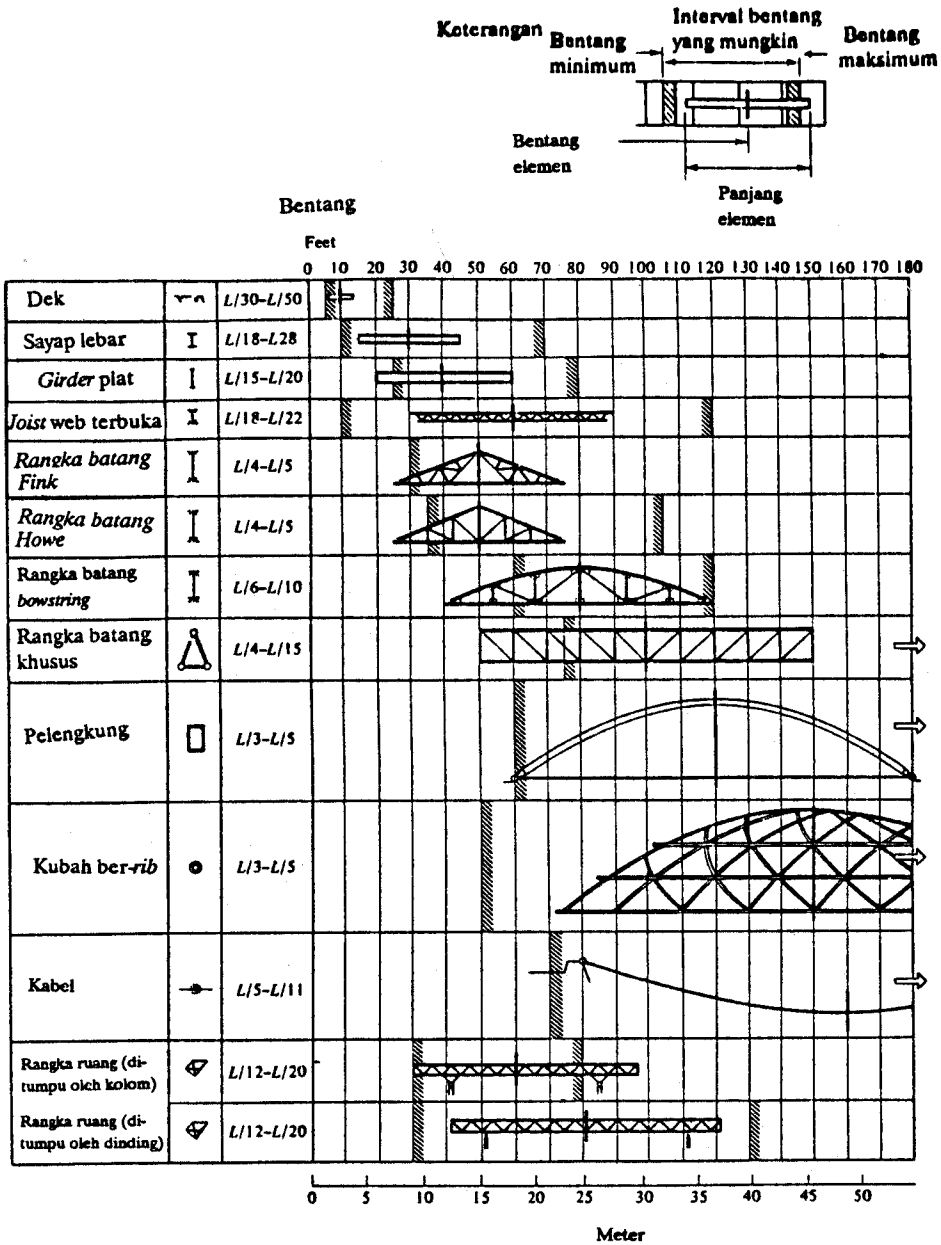
Rangka Batang (Truss) dan Joists Web Terbuka. Ada tak hingga variasi konfigurasi rangka batang yang mungkin digunakan. Kita juga dapat membuat rangka batang yang dibuat atau dirancang secara khusus untuk bentang dan beban yang sangat besar.

Joists web terbuka, yang merupakan produksi besar-besaran [lihat Gambar 15–6 (b)], dapat digunakan baik untuk sistem lantai maupun atap. Elemen ini umumnya relatif ringan dan terdistribusi merata. *Joist* web terbuka umumnya ditumpu sederhana (tetapi bila diperlukan, kita dapat membuat hubungan kaku). Pada sistem yang sama kita dapat menggunakan *joist* web terbuka dan flens lebar yang mempunyai titik hubung yang dapat memikul momen sehingga kita mendapat aksi rangka yang dapat menahan beban lateral.

Untuk situasi bentang yang sangat besar kita dapat menggunakan *joist* web terbuka khusus. Eiemen khusus ini umumnya cocok digunakan pada atap gedung yang bebannya ringan dan terdistribusi merata.

Pelengkung. Pelengkung kaku dengan berbagai bentuk dapat dibuat dari baja. Pelengkung yang telah dibuat di luar lokasi (prefabricated) telah tersedia untuk bentang kecil sampai menengah. Telah ada pelengkung yang dirancang secara khusus dan mempunyai bentang sangat panjang [misalnya bentang 300 ft (90 m) atau lebih]. Dek baja ringan yang berdimensi kecil umumnya digunakan untuk membentuk permukaan terluarnya. Pada situasi bentang kecil, permukaan baja melengkung dapat dibuat dengan menekan lembaran baja secara khusus serupa dengan cara yang digunakan dalam membuat bentuk baja berkelengkungan tunggal maupun ganda pada badan mobil.

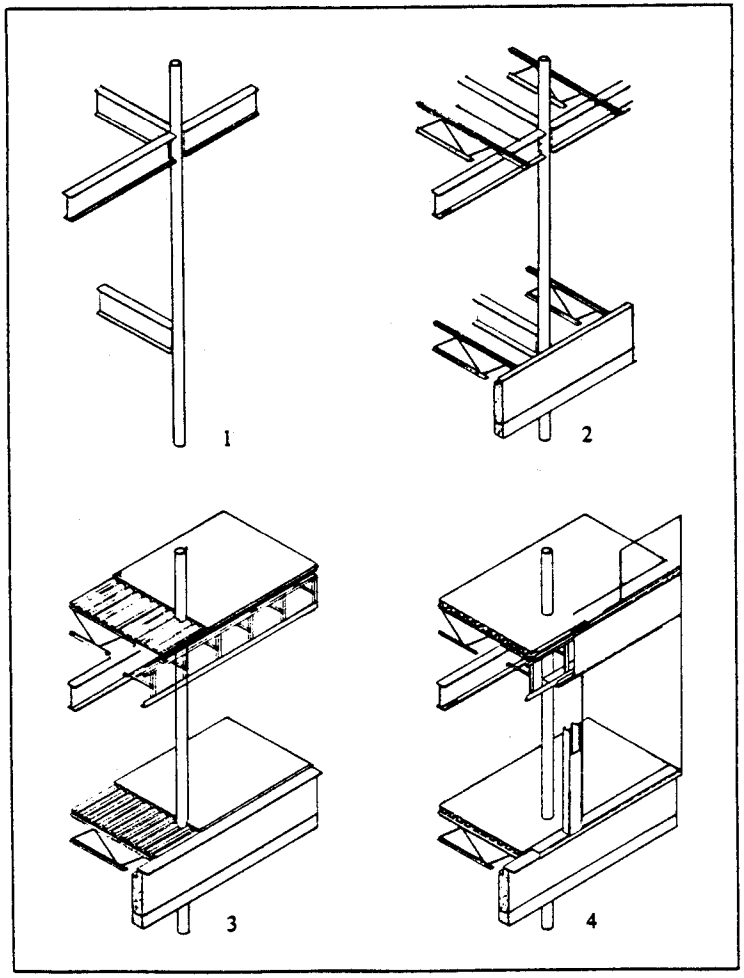
Struktur Kabel. Baja adalah satu-satunya material yang dapat digunakan sebagai struktur kabel. Bentuk struktur kabel yang dapat dibuat tak hingga banyaknya. Kabel dapat digunakan untuk atap permanen yang permukaan penutupnya dapat berupa elemen planar baja kaku atau permukaan membran. Permukaan kaku biasanya mempunyai bentuk berkelengkungan tunggal, sedangkan permukaan membran



Gambar 15-7 Pendekatan batas-batas bentang untuk sistem baja. Agar ukuran khas pada elemen struktur yang berbeda mudah dibandingkan, diagram ini digambar secara berskala untuk memperlihatkan panjang bentang khas masing-masing jenis elemen. Panjang bentang yang secara aktual mungkin digunakan untuk setiap elemen disebut sebagai "maksimum" dan "minimum".

biasanya berkelengkungan ganda. Atap yang dapat berpindah juga dapat menggunakan sistem kabel [lihat Gambar 15–6(1)]. Atap demikian biasanya merupakan penutup sementara atau semipermanen.

Ukuran Elemen Struktur. Gambar 15–7 mengilustrasikan batas-batas perbandingan tinggi-bentang untuk beberapa sistem baja yang umum digunakan. Kolom baja struktural umumnya mempunyai perbandingan tebal-tinggi bervariasi antara 1 : 24 dan 1 : 9, bergantung pada beban dan tinggi kolom.



GAMBAR 15–8 Gedung Administrasi Rumah Sakit Willard State, Cortland, N.Y. Werner Seligmann, Arsitek. Hubungan antara struktur dan lapisan penutup. (Gambar oleh Jeffrey Berg, Carl Gaines, David Holdorf, dan Brian Randoll).

Konteks Struktur. Perlu diingat bahwa struktur suatu gedung hanyalah merupakan salah satu aspek dari keseluruhan gedung (Gambar 15–8). Pemilihan sistem penutup, misalnya, dapat menentukan jenis sistem struktural yang digunakan berikut segala karakteristiknya (begitu pula sebaliknya). Kita jarang dapat menentukan sistem struktural tanpa memperhatikan sistem gedung lainnya.

SOAL

15–1. Carilah gambar kerja untuk gedung baja struktural, usahakan yang terdapat di sekitar tempat tinggal pembaca. Buatlah gambar dengan skala seperti terlihat pada Gambar 15–6. Disarankan untuk menggunakan skala ¾ in. = 1 ft untuk menggambarkan detail hubungan dan skala ¼ in. = 1 ft untuk menggambarkan tampak.

15–2. Ulangi Soal 15–1, tetapi untuk gedung yang terbuat dari beton bertulang yang dicor di tempat.

15–3. Ulangi Soal 15–1, tetapi untuk gedung yang dibuat dari elemen beton pracetak.

15–4. Ulangi Soal 15–1, tetapi untuk gedung yang dibuat dari lapisan elemen-elemen kayu.

15–5. Kunjungilah empat gedung yang masing-masing mempunyai jenis sistem struktural dan ukuran dimensi elemen struktural kritis (misalnya balok, kolom, rangka batang) berbeda. Buatlah informasi yang menunjukkan suatu pedoman sederhana mengenai ukuran tersebut (misalnya dalam bentuk perbandingan L/d).

Bab 16

HUBUNGAN

16.1 PENDAHULUAN

Bagaimana elemen struktur saling berhubungan sering kali merupakan masalah desain yang sangat kritis, dan hal ini dapat mempengaruhi penentuan sistem struktural dasarnya, khususnya pola serta materialnya. Strategi yang mungkin dalam menggabungkan elemen-elemen struktural sangat bergantung pada geometri dan sifat fisik elemen-elemen yang akan digabungkannya. Sebagian masalah ini telah dibahas pada Bab 14.3. Pada Bab 16 ini pembahasannya akan diperluas lagi.

16.2 JENIS-JENIS DASAR TITIK HUBUNG

Tinjaulah elemen-elemen struktur kaku linear sederhana yang tergabung. Jelas bahwa titik hubung yang lazim digunakan untuk ini adalah yang bersifat *menumpang tindih elemen-elemen, mengubah bentuk, dan menguncinya.* Titik hubung yang monolit, khususnya pada beton bertulang, juga mungkin.

Titik hubung yang disebutkan di atas banyak pula yang menggunakan *elemen ketiga* sebagai penghubung. Baut, paku keling, dan las adalah contoh elemen ketiga yang dimaksud. Alat penghubung yang berupa elemen ketiga juga memerlukan potongan kecil lain sebagai tambahan (misalnya plat penutup). Fungsi utama elemen-elemen penghubung tersebut membantu dalam meneruskan gaya-gaya yang ada di titik hubung dari satu elemen struktur ke elemen struktur lainnya. Baut yang menghubungkan dua elemen yang tumpang tindah, misalnya, meneruskan gaya-gaya dari satu elemen ke elemen lainnya sehingga timbul gaya geser pada baut tersebut. Sebagaimana akan dibahas berikut ini, tidak semua titik hubung dalam menjalankan fungsinya memerlukan elemen ketiga. Apabila digunakan, alat-alat hubung

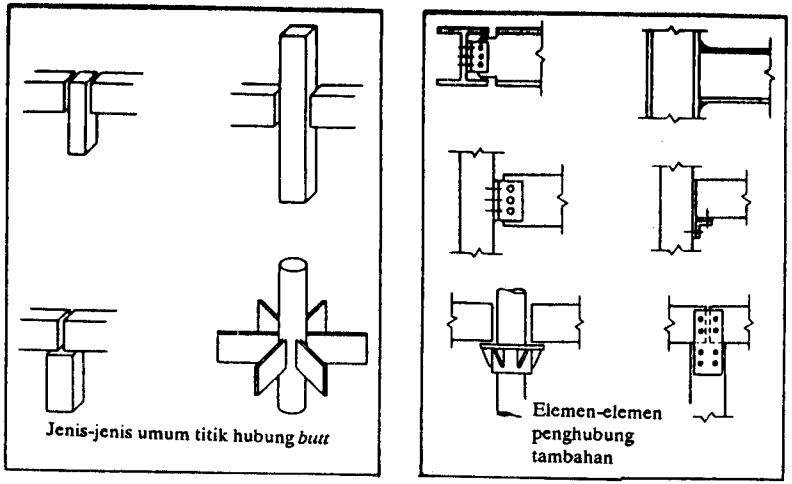
maupun elemen-elemen tambahannya umumnya mempunyai dimensi absolut lebih kecil daripada elemen utama yang dihubungkannya, tetapi mempunyai kekuatan relatif lebih besar. Apabila kekuatan penyambung relatif sama dengan kekuatan elemen yang disambungnya, hubungan yang ada akan lebih besar sehingga dapat menyalurkan beban dengan aman.

Gambar 16–1(a) mengilustrasikan beberapa titik hubung *butt* (butt joints). Titik hubung ini dapat dibuat bersifat sendi maupun jepit. Pada titik hubung demikian, biasanya elemen vertikal atau horizontal (tetapi jarang kedua-duanya) dapat dibuat menerus melalui titik hubung itu. Hal ini mempunyai implikasi struktural yang sangat berarti karena, apabila kontinuitas diinginkan secara vertikal ataupun secara horizontal, kita harus menggunakan titik hubung kaku khusus dengan elemen tambahan. Pada konstruksi baja, misalnya, umum untuk membuat kolom menerus dan menyambung balok pada sisi-sisi kolom itu. Apabila aksi rangka (frame action) diinginkan, kita buat titik hubung kaku. Titik hubung *butt* dapat secara mengutungkan digunakan pada pola rangka horizontal meskipun hal ini tidak biasa. Gambar 16–1(a) mengilustrasikan betapa banyaknya elemen struktur horizontal yang dapat bertemu di satu titik hubung pada kolom dengan menggunakan elemen ketiga. Dalam hal ini kolomnya selalu menerus, dan baloknya tidak menerus kecuali apabila kita membuat hubungan kaku yang khusus.

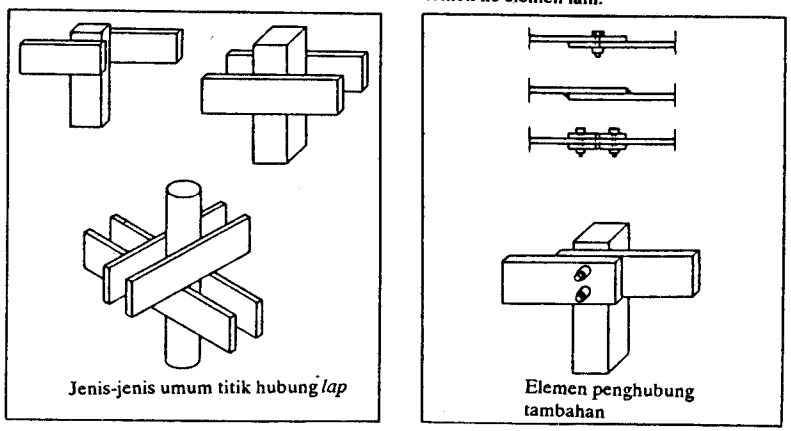
Gambar 16–1(b) memperlihatkan beberapa titik hubung *lap*. Titik hubung demikian khususnya berguna apabila kita menginginkan kedua elemen yang dihubungkan menerus di titik hubung tersebut. Elemen ketiga diperlukan untuk menggabungkan kedua-duanya. Cara ini sering digunakan pada konstruksi kayu untuk memperoleh kontinuitas. Hubungan seperti ini menghasilkan sistem yang bersifat satu arah. Penggabungan elemen dengan pola kompleks sulit dihubungkan dengan jenis titik hubung ini.

Gambar 16–1(c) mengilustrasikan beberapa titik hubung *deformed* di mana elemen struktur *diubah bentuknya* untuk membuat hubungan. Cara hubungan yang terlihat pada bagiaan kanan Gambar 16–1(c) sering digunakan untuk material yang mudah dicetak, misalnya beton bertulang. Banyak sistem gedung beton pracetak yang menggunakan hubungan demikian. Elemen-elemen kayu juga dapat dibentuk untuk membuat konstruksi seperti ini. Titik hubung *mortise* dan *tendon* merupakan salah satu contohnya. Pada umumnya, jenis titik hubung dengan elemen yang dibentuk ini bersifat menghubungkan elemen-elemen secara sederhana atau sendi. Sekalipun demikian, kita dapat saja membuatnya menjadi kaku.

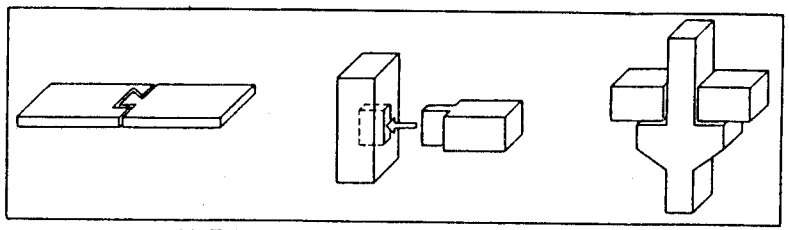
Titik hubung yang dibuat dengan cara pada Gambar 16–1(a), (b), maupun (c) kadang-kadang tidak memerlukan elemen ketiga. Kadang-kadang penggunaan cara mengubah bentuk dan mengunci (interlocking) mengandung arti bahwa elemen struktur yang dihubungkan harus lebih besar di titik hubung untuk mengakomodasikan deformasi tersebuut. Dalam banyak hal, pembesaran ini dapat menyebabkan elemen struktur lainnya relatif lebih besar juga, sedemikian rupa sehingga elemen berukuran konstan dapat digunakan. Kadang-kadang elemen ketiga sebagai penghubung digunakan secara internal pada titik hubung *deformed* (misalnya pada beton yang dicor di tempat, baja tulangan khusus digunakan di titik hubung tersebut).



(a) Titik hubung *butt*. Titik hubung *butt* hampir selalu memerlukan penggunaan satu atau lebih elemen penghubung dalam menyalurkan beban dari satu elemen ke elemen lain.



(b) Titik hubung *lap*. Titik hubung *lap* juga umumnya memerlukan penggunaan satu atau lebih elemen penghubung dalam menyalurkan beban dari satu elemen ke elemen lain.



(c) Titik hubung berubah bentuk dan atau mengunci (interlocking). Elemen-elemen kecil tambahan juga sering digunakan, tetapi elemen kecil ini hanya sedikit kontribusinya dalam menyalurkan gaya.

Gambar 16-1 Jenis dasar titik hubung

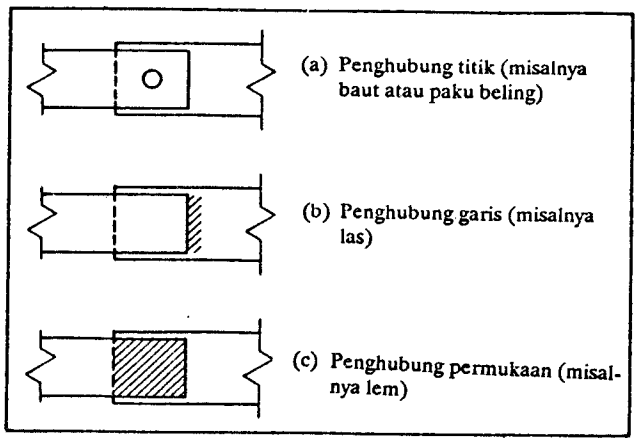
16.3 JENIS-JENIS DASAR PENGHUBUNG

16.3.1 Tinjauan Umum

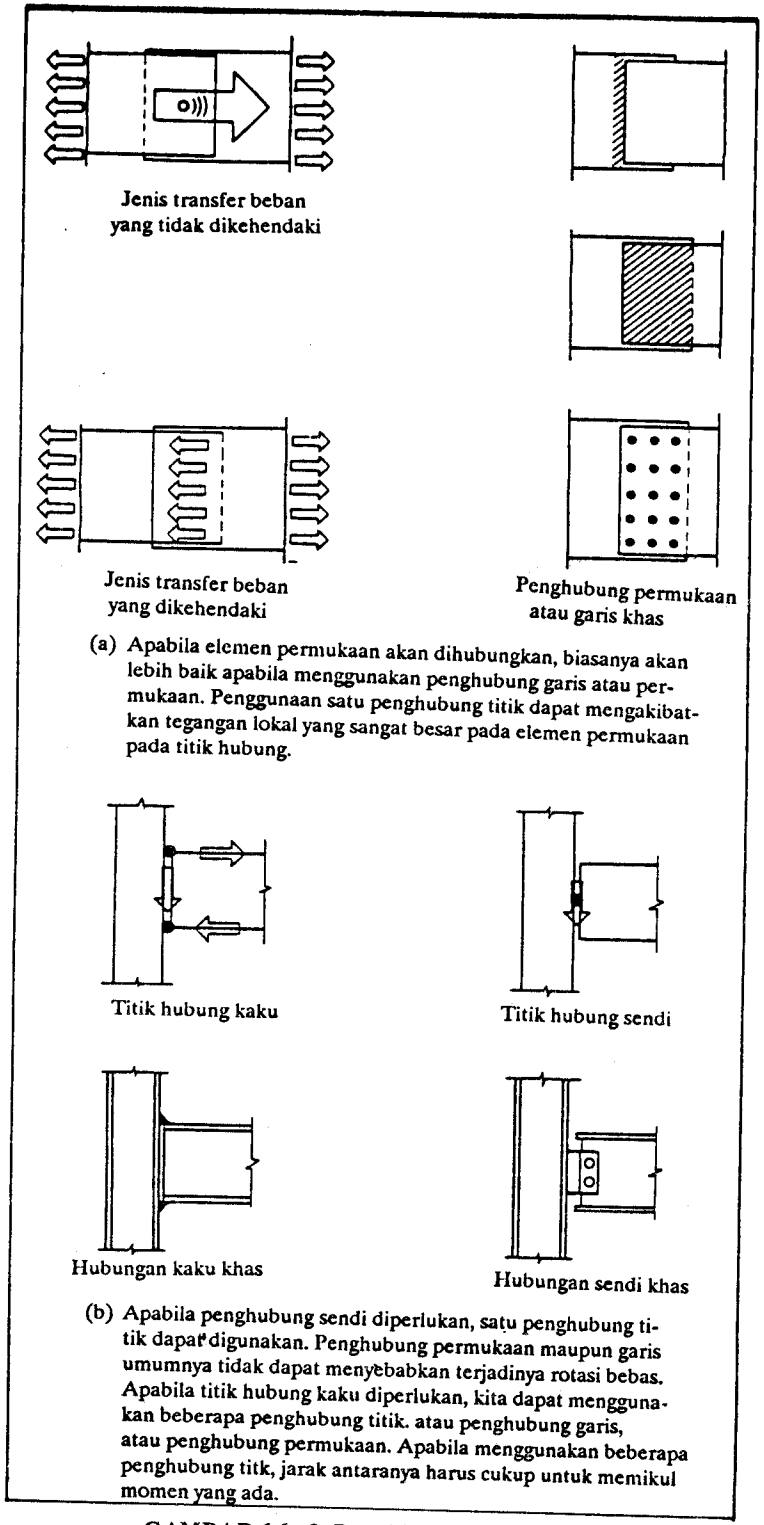
Jenis-jenis elemen ketiga sebagai penghubung yang umum digunakan pada titik hubung dapat dikelompokkan sebagai penghubung *titik* (misalnya baut, paku, paku keling), penghubung garis (misalnya las), dan penghubung *permukaan* (misal permukaan berlem). Ketiga kelompok ini diperlihatkan pada Gambar 16–2. Jenis umum penghubung yang digunakan sangat bergantung pada geometri dan perilaku fisik elemen-elemen yang akan dihubungkan. Penggabungan permukaan-permukaan kaku besar, misalnya, umumnya memerlukan penghubung yang terdistribusi. Penggabungan dua lembaran *plywood* secara tumpang tindih (lapping) dengan menggunakan satu baut, misalnya, tidak mungkin karena tegangan lokal yang sangat besar akan timbul pada *plywood* di sekitar baut. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan tumpu. Cara yang lebih baik adalah menggunakan sejumlah baut yang lebih kecil dan terdistribusi sedemikian rupa sehingga besar beban yang disalurkan oleh setiap baut menjadi relatif kecil. Alternatif lain adalah menggunakan titik hubung *lap* atau titik hubung berlem, bergantung pada beban yang ada.

Pendekatan umum yang disebutkan di atas mengenai penggunaan hubungan titik terdistribusi (hubungan garis atau hubungan permukaan) sangat berguna untuk berbagai situasi. Memang benar bahwa hubungan satu titik dapat secara efektif digunakan pada banyak situasi (khususnya pada elemen struktur yang mempunyai dimensi kecil, tetapi pendekatan dengan cara distribusi biasanya dapat mencegah terpusatnya tegangan pada elemen struktur yang digabungkan.

Faktor lain yang perlu ditinjau dalam memilih titik hubung adalah penentuan sifat sendi atau jepit pada titik hubung tersebut (Gambar 16.3). Seperti telah sering disebutkan, sifat ini masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian sendiri-sendiri. Hubungan satu titik tentu saja paling cocok untuk membuat titik hubung



GAMBAR 16–2 Jenis-jenis dasar hubungan titik hubung *lap*.



GAMBAR 16–3 Pemilihan jenis penghubung.

sendi, sedangkan hubungan garis dan hubungan permukaan lebih mendekati sifat titik hubung jepit. Sekalipun demikian, hubungan titik dapat digunakan untuk membuat titik hubung kaku apabila paling sedikit dua hubungan titik digunakan, yang kedua-duanya mempunyai jarak (misalnya di atas dan bawah elemen struktur) sedemikian rupa sehingga momen internal tahanan dapat timbul. Gaya-gaya yang timbul pada kedua hubungan titik yang terpisahkan mempunyai lengan momen dan menghasilkan momen tahanan. Semakin besar jarak antara hubungan tersebut, (**) akan semakin kecil gaya-gaya yang terjadi pada hubungan untuk memberikan momen tahanan yang sama.

Hubungan garis atau permukaan dapat digunakan untuk mendekati sifat titik hubung sendi apabila dilokalisasikan pada daerah sekitar sumbu netral elemen struktur yang dihubungkan, dan apabila titik hubung tersebut semakin kecil dibandingkan dengan elemen primernya.

163.2 Baut dan Paku Keling

Titik hubung berbaut, ber-*lap*, dan sederhana mempunyai kekuatan yang didasarkan atas kapasitas geser baut terhadap gaya-gaya yang harus disalurkannya. Akan tetapi, ada pula jenis titik hubung baut yang tidak bergantung pada kapasitas geser bautnya sama sekali. Baut sering dikencangkan sedemikian rupa sehingga gaya gesekan yang timbul di antara plat-plat yang paling tumpang tindih cukup untuk menyalurkan gaya-gaya di antara elemen-elemen plat tersebut. Tentu saja dalam hal ini ada masalah lain yang timbul, yaitu masalah tumpu (bearing). Kita harus berhati-hati dalam menentukan apakah baut memang benar-benar dikencangkan atau tidak. Berikut ini dibahas beberapa jenis titik hubung sederhana yang hanya mendasarkan kekuatannya pada kapasitas geser baut atau paku keling.

Baut atau paku keling biasanya digunakan pada situasi yang melibatkan titik hubung *lap*. Pada titik hubung *lap* yang khas (Gambar 16–4) ada beberapa jenis kegagalan yang dapat terjadi: kegagalan geser pada baut, kegagalan tarik pada elemen struktur yang berkurang luasnya, keruntuhan atau kegagalan tumpu pada elemen struktur yang diabaikan oleh tegangan tumpu yang sangat besar pada bidang temu dengan baut, kegagalan geser pada elemen struktur di belakang baut, dan kegagalan karena sobeknya elemen struktur di belakang baut.

Dalam menentukan ukuran baut pada hubungan *lap* sederhana, tinjauan yang paling penting adalah tegangan geser pada baut dan tegangan tumpu pada elemen struktur yang dihubungkan. Terhadap tegangan geser, kita dapat menganggap bahwa tegangan geser terdistribusi secara merata pada muka baut. Asumsi ini umumnya sahih apabila tinggi luas geser kecil dan jarak di antara gaya-gaya geser juga kecil. Ini adalah jenis kondisi yang ada apabila baut digunakan untuk menghubungkan plat-plat. Pendekatan demikian tidak sahih dan akan tidak aman apabila digunakan pada situasi yang melibatkan luas geser besar dan jarak besar di antara gaya-gaya geser – hal yang umum terjadi pada balok. Apabila tegangan geser dapat dianggap terdistribusi merata, besarnya dapat dengan mudah ditulis sebagai $f_v = P/A$ di mana P adalah beban yang bekerja dan A adalah luas penampang melintang baut. Beban geser izin pada baut yang mengalami keadaan geser tunggal dan diilustrasikan pada

Gambar 16–4 (a) adalah $P_v = AF_v$, di mana A adalah luas penampang melintang baut dan F_v adalah tegangan izin geser pada baut. Dengan demikian, $P_v = (\pi d^2/4)F_v$.

CONTOH

Untuk baut yang mengalami geser tunggal, berapakah diameter yang diperlukan apabila gaya geser yang ada, P_v adalah 4000 lb (17992 N)? Anggap bahwa F_v = 14000 lb/in^2. (96,5 N/mm^2).

Solusi:
Luas yang diperlukan:

$$A = \frac{P_v}{F_v} = \frac{4000 \text{ lb}}{14.000 \text{ lb/in.}^2} = 0{,}285 \text{ in.}^2$$
$$= \frac{17.992 \text{ N}}{96{,}5 \text{ N/mm}^2} = 184 \text{ mm}^2$$

Diameter yang diperlukan:

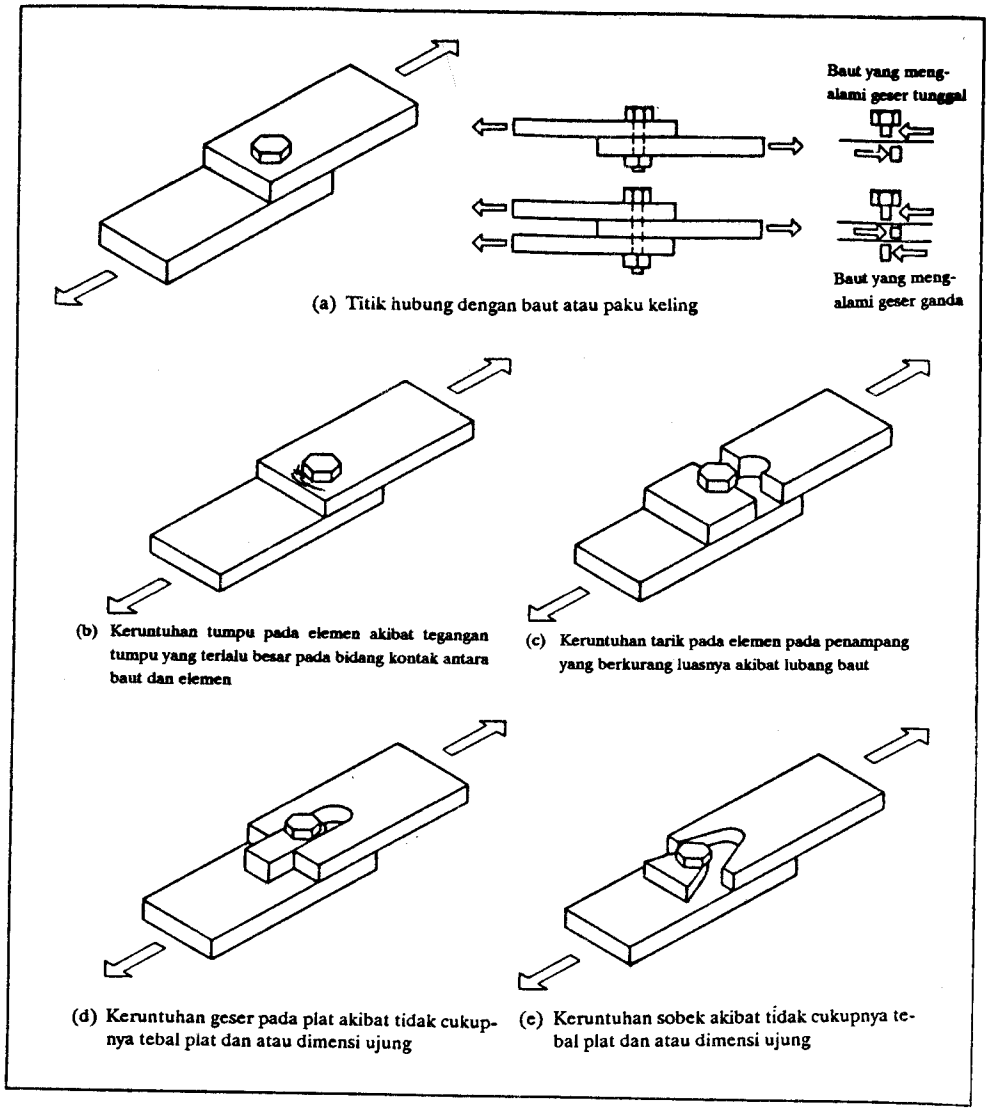
$$\frac{\pi d^2}{4} = 0{,}285 \text{ in.}^2 \text{ atau } d = 0{,}605 \text{ in.}$$
$$= 184 \text{ mm}^2 \text{ atau } d = 15{,}3 \text{ mm}$$

Jadi, kita gunakan ukuran baut terdekat yang ada di perdagangan. Apabila baut tersebut berada dalam keadaan geser rangkap seperti terlihat pada Gambar 16–4(a), ada dua bidang geser sehingga $P_v = 2\,(\pi d^2/4)\,F_v$.

Tegangan tumpu dapat secara mudah dihitung dari $f_b = P/A_b$ di mana A_b adalah luas permukaan kontak baut dan plat. A_b biasanya diambil sebagai luas proyeksi buat, atau $A = td$. Dengan demikian, $f_b = P/td$. Tegangan tumpu sering kali menentukan di dalam desain titik hubung. Jelas bahwa tegangan tumpu dapat diperkecil, baik dengan memperbesar tebal plat yang ada ataupun dengan menggunakan diameter baut yang lebih besar.

Jenis beban izin lain untuk elemen-elemen yang tersambung dapat diperoleh secara mudah dengan meninjau luas bidang runtuh yang mungkin (A_p) dan mengingat bahwa $P_{maks} = F_p A_p$ di mana F_p adalah tegangan izin untuk ragam kegagalan yang ada.

Apabila baut dibebani secara tidak simetris, kita harus berhati-hati dalam menghitung gaya yang terjadi di setiap baut karena dalam hal ini akan ada aksi torsi terhadap sistem baut (lihat F.L. Singer, *Strength of Materials*, 2nd ed., Harper & Row, Publisher, New York, 1962, Bab 2).



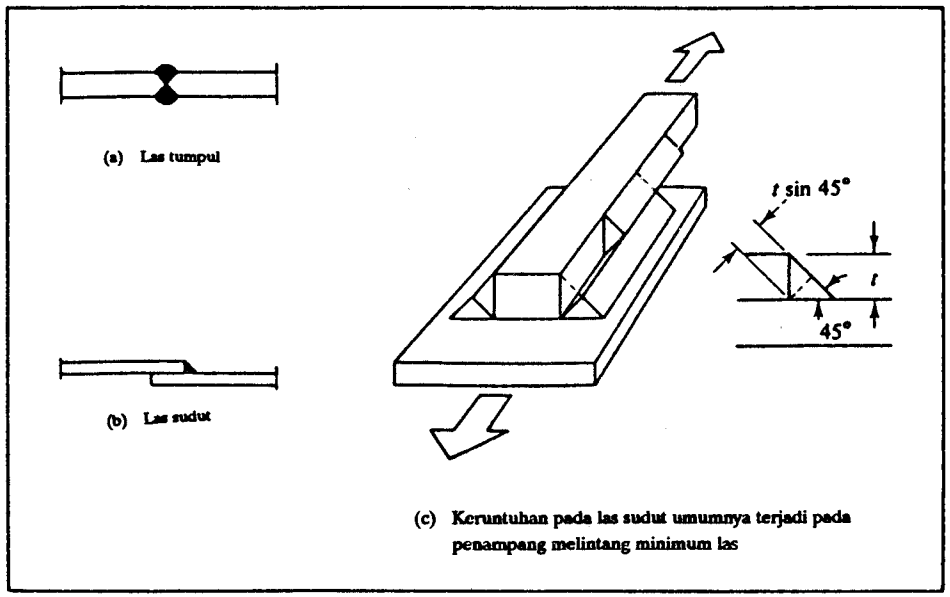
GAMBAR 16–4 Jenis-jenis kegagalan pada titik hubung baut atau paku keling.

16.3.3 Titik Hubung Las

Pengelasan adalah penggabungan logam dengan cara fusi. Logam leleh yang sangat panas dari batang las ditempelkan pada plat yang disambung. Dengan demikian, titik hubung yang diperoleh akan homogen dan menerus. Sangat banyak jenis titik hubung las, tetapi sebagian besar merupakan variasi dari dua jenis dasar, yaitu las tumpul dan las sudut (lihat Gambar 16–5).

Kekuatan satu unit panjang las tumpul terhadap tarik sama dengan tegangan izin material las dalam keadaan tarik dikalikan tebal minimum las. Untuk suatu tebal tertentu, panjang las yang digunakan berbanding langsung dengan beban yang disalurkan.

Kekuatan las sudut bergantung pada tahanan geser las, pada bidang las dengan luas minimum, seperti terlihat pada Gambar 16–5(c). Apabila tebal las adalah t, maka luas minimum yang dimaksud adalah $A = Lt \sin 45^{\circ}$ di mana L adalah panjang las. Dengan demikian, kekuatan las adalah $P = AF_v = L\,(0{,}707)\,(F_v)$. *Tegangan izin material* yang umum digunakan adalah F_v = 13600 lb/in.^{2}. Dengan demikian, P = 9600tL. Apabila dinyatakan dalam tebal las $\frac{1}{16}$ in. dan panjang las 1 in., maka P = (600 lb/in.)($\frac{1}{16}$ in.). Angka-angka seperti ini sangat berguna untuk mencari dengnan cepat panjang las dan tebal yang diperlukan untuk nilai beban tertentu. Beban 4000 lb, misalnya, memerlukan las $\frac{1}{16}$ in. sepanjang 8 in., atau las $\frac{1}{8}$ in. sepanjang 4 in., atau $\frac{1}{4}$ in. sepanjang 2 in.



Gambar 16-5 Titik hubung las

Sebagaimana dengan baut, kita harus berhati-hati dalam menggunakan titik hubung las yang dibebani tidak simetris karena pada sistem demikian ada efek torsi. Sebagai contoh, pada profil siku yang dilas ke plat, bebannya kelihatan simetris, begitu pula letak lasnya, tetapi sebenarnya las tersebut menerima beban yang tidak simetris karena titik berat profil tidak simetris (lihat Singer, *Strength of Materials).*

Soal

16–1. Pelajari dan gambarlah diagram beberapa jenis titik hubung struktural yang terdapat pada gedung di sekitar daerah pembaca. Klasifikasikan jenis titik hubung tersebut, apakah *lapped, butt,* atau *deformed* (atau kombinasi dari itu). Apakah ada elemen ketiga?

16–2. Terhadap gaya geser saja, berapakah diameter yang diperlukan untuk baut yang mengalami geser tunggal dan harus menyalurkan gaya geser sebesar 6000 lb di antara kedua plat? Anggap bahwa $F_v = 14000.\text{lb/in.}^2$.

Jawaban: diameter $\frac{3}{4}$ in.

16–3. Berapa panjang las yang diperlukan untuk menyalurkan gaya geser 6000 lb dari satu plat ke plat lain apabila tebal las adalah $\frac{1}{8}$ in.? Anggap bahwa $F_v = 13600\ \text{lb/in.}^2$.

Jawaban: 5 in.

LAMPIRAN

A1 – A13

LAMPIRAN 1: TABEL KONVERSI

Tabel berikut ini memperlihatkan hubungan antara sistem satuan yang pada saat ini digunakan di Amerika Serikat, sistem metrik konvensional, dan sistem *Satuan Internasional* (SI). Sistem SI adalah sistem satuan yang pada saat ini lebih banyak digunakan.

Satuan Amerika Serikat	*Satuan metrik konvensional*	*Satuan SI*
Panjang		
1 ft	0,3048 m	0,3048 m
1 in.	2,540 cm	25,40 mm
Luas		
1 ft^2	929,0 cm^2	0,09290 m^2
1 $in.^2$	6,452 cm^2	645,2 mm^2
Berat jenis		
1 lb/ft^2	16,019 kg/m^3	16,019 kg/m^3
Gaya		
1 lb	0,4536 kg	4,448 N
Momen		
1 ft-lb	0,1383 kg-m	1,356 N.m
1 in.-lb	0,01152.kg-m	0,1130 N.m

Tegangan		
1 lb/ft^2 (psf)	4,882 kg/m^2	47,88 N/m^2 = 47,88 Pa
1 lb/in.^{2} (psi)	0,07031 kg/cm^2	6895 N/m^2 = 6,895 kPa
		= 0,006895 N/mm^2
		= 0,006895 MPa
Modulus penampang		
1 in.^{3}	16,39 cm^3	16,39 X 10^3 mm^3
Momen inerias		
1 in.^{4}	41,62 cm^4	416,2 X 10^3 mm^4

Satuan gaya pada sistem SI adalah newton (N). Satu newton adalah gaya yang diperlukan agar massa 1 kologram mengalami percepatan 1 meter/detik^2. Karena berat merupakan gaya, maka ukurannya adalah newton. Karnan percepatan akibat gravitasi bumi adalah 9,807 m/detik^2, maka berat 1 kilogram massa adalah 9,807 N. Perlu dicatat pula bahwa:

1 pascal (Pa)	=	1 N/m^2		
1 kPa	=	1 X 10^3 N/m^2	=	1 X 10^{-3} N/mm^2
1 MPa	=	1 X 10^6 N/m^2	=	1 N/mm^2

LAMPIRAN 2: PUSAT BERAT

Dalam mempelajari mekanika kita perlu mengetahui pusat massa dan pusat gravitasi suatu benda serta pusat berat suatu bentuk geometri. Pusat massa adalah sebuah titik yang menunjukkan posisi massa suatu benda. Pusat gravitasi suatu benda pada dasarnya menunjukkan posisi resultan gaya gravitasi bumi pada benda tersebut, jadi juga titik pada suatu benda di mana benda itu dapat berada dalam keseimbangan. Jelas bahwa konsep psuat berat hanya dapat diterapkan pada benda yang mempunyai berat. Sebutan pusat berat (centroid) digunakan untuk menunjukkan titik analogisnya pada bentuk geometri seperti garis atau luas. Pusat berat suatu luas dapat didefinisikan sebagai titik di mana seluruh luas dapat dipandang terpusat dan mempunyai momen yang sama terhadap sembarang sumbu dengan luas terdistribusi semula. Sehubungan dengan defnisi ini, ada gunanya untuk memvisualkan gambar geometri yang ditinjau, seperti luaas planar, sebagai suatu bentuk dengan tebal tak hingga kecil dan massa seragam per satuan luas. Jelas bahwa hal ini analog dengan pusat gravitasi pada suatu benda. Jadi, pusat berat suatu luas dapat divisualkan sebagai titik di mana gambar geometri dapat seimbang. Memang, kita dapat saja membuat definisi yang lebih tepat lagi seperti yang dapat dibaca pada banyak buku kalkulus. Formulasi yang umum digunakan adalah sebagai berikut. Untuk suatu luas planar pada bidang xy, koordinat pusat berat adalah:

$$\bar{x} = \frac{\int_A x\,dA}{A} \qquad \bar{y} = \frac{\int_A y\,dA}{A}$$

Ekspresi ini adalah pernyataan formal sederhana dari definisi yang telah disebutkan di muka. Jumlah aljabar momen dari masing-masing luas kecil terhadap suatu titik atau garis sama dengan momen dari luas total terhadap titik atau garis yang sama. Sebutkan $x\,dA$ dan $y\,dA$ sering disebuut sebagai *momen pertama* dari suatu luas terhadap sumbu referensi. Apabila sumbu referensi itu berimpit dengan sumbu berat (sumbu $\bar{x} = 0$ dan $\bar{y} = 0$), maka:

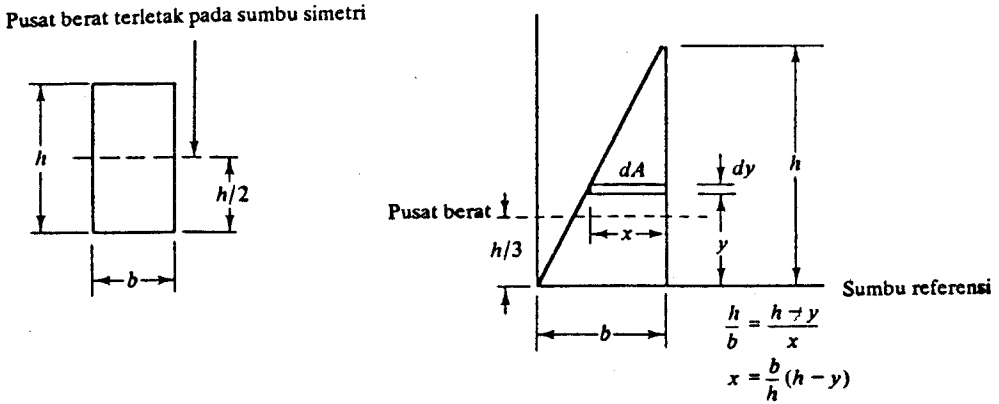
$$\int_{A_e} x\,dA = 0 \qquad \int_{A_e} y\,dA = 0$$

Apabila suatu luas simetris terhadap suatu sumbu, maka pusat berat selalu berimpit dengan sumbu simetri (lihat Gambar A–2–1). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa momen suatu luas pada sisi-sisi yang berlawanan terhadap sumbu sama besar tetapi berlawanan tanda. Untuk suatu luas yang mempunyai lebih dari satu sumbu simetri, pusat berat harus berupa titik yang merupakan titik potong sumbu-sumbu simetri luas tersebut.

Penentuan lokasi pusat berat suatu luas adalah proses yang sangat mudah, yaitu dengan menggunakan persamaan untuk x dan y. Sembarang sumbu referensi dapat digunakan untuk mendapat pusat berat suatu luas. Proses mencari pusat berat beberapa bentuk luas, misalnya segitiga, akan diilustrasikan berikut ini. Alas segitiga kita pilih sebagai sumbu referensi.

CONTOH

Carilah pusat berat segitiga yang terlihat pada Gambar A–2–1.



(a) Penampang simetris (b) Penampang tak simetris

GAMBAR A–2–1 Pusat berat gambar geometrik

Solusi:

Mula-mula kita tulis ekspresi yang akan digunakan.

$$\bar{y} = \frac{\int_A y\,dA}{A} = \frac{\int_A y\,dA}{\int dA}$$

Jadi,

$$dA = x\,dy = \frac{b}{h}(h - y)\,dy$$

Dengan demikian,

$$\bar{y} = \frac{\int_0^h y[(b/h)(h - y)]\,dy}{\int_0^h (b/h)(h - y)\,dy} = \frac{1}{3}h$$

Bentuk-bentuk kompleks yang umum disebut sebagai luas *komposit* dapat dipandang sebagai gabungan dari bentuk-bentuk geometris sederhana. Apabila suatu luas dapat dibagi atas bagian-bagian (di mana lokasi pusat berat masing-masing bagian telah diketahui), lokasi pusat berat keseluruhan luas tersebut dapat diperoleh tanpa menggunakan integrasi. Hal ini dilakukan dengan cara menjumlahkan secara aljabar momen luas masing-masing bagian dan membagi hasilnya dengan luas total. Prosedur ini sesuai dengan definisi yang telah disebutkan di atas. Jadi, secara formal lokasi pusat berat dapat dicari dengan menggunakan:

$$\bar{x} = \frac{\sum A_{x_i}}{A_T} \qquad \bar{y} = \frac{\sum A_{y_i}}{A_T}$$

Ekspresi ini tentu saja sama dengan $x = \int x\,dA\,/\,A$ dan $y = \int y\,dA/A$. Contoh penggunaan ekspresi ini diberikan pada Bab 6.

LAMPIRAN 3: MOMEN INERSIA

L.3.1 Formulasi Umum

Salah satu ekspresi umum yang banyak dijumpai dalam analisis struktur adalah bentuk $\int y^2\,dA$. Ekspresi ini umum disebut sebagai momen inersia (I) dari suatu luas terhadap sumbu referensi. Dari rumusannya terlihat ada sedikit arti fisik. Akan bentuk $\int y^2\,dA$. Ekspresi ini umum disebut sebagai momen inersia *(I)* dari suatu luas terhadap sumbu referensi. Dari rumusannya terlihat ada sedikit arti fisik. Akan tetapi, dalam konteks analisis balok, kolom, dan elemen lain besaran ini menunjukkan deskripsi umum bagaimana distribusi material pada elemen struktur tersebut terhadap referensi penampang melintangnya.

Momen inersia dari suatu luas terhadap suatu sumbu referensi yang terletak pada bidang luas itu dapat didefinisikan sebagai jumlah hasil kali elemen luas dengan kuadrat jarak elemen luas tersebut ke sumbu referensi. Dengan demikian, momen

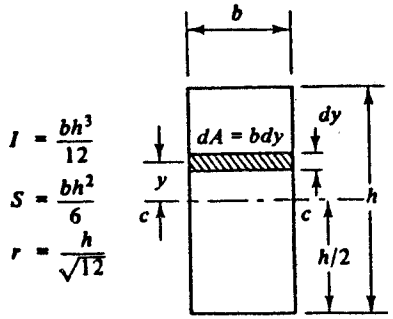
inersia suatu luas terhadap sumbu x dan y berturut-turut adalah:

$$I_x = \int_A y^2\,dA \qquad I_y = \int_A x^2\,dA$$

Sebutan *momen inersia* dapat saja membingungkan karena inersia adalah besaran yang dimiliki oleh benda fisik saja. Karena ekspresi di atas dapat ditulis sebagai $I_x = \int_A y\,(y\,dA)$ dan $I_y = \int_A x\,(x\,dA)$, maka biasanya sebutan *momen kedua* dari suatu luas lebih baik digunakan daripada sebutan momen inersia. Momen pertama dari suatu luas, sebagaimana telah disebutkan sebelum ini, adalah bentuk $x\,dA$ dan $y\,dA$. Jadi, dengan mengalikan suku ini dengan jarak, akan diperoleh momen kedua dari suatu luas. Momen pertama dari suautu luas terhadap suatu sumbu dapat mempunyai tanda positif maupun negatif, sedangkan momen kedua dari suatu luas terhadap suatu sumbu selalu bertanda positif. Bagaimana pun, pada banyak buku, juga termasuk buku ini, sebutan momen inersia lebih banyak digunakan daripada sebutan momen kedua dari suatu luas.

CONTOH

Perhatikan segitiga yang terlihat pada Gambar A–3–1. Tentukanlah momen inersia I dari luas tersebut terhadap sumbu beratnya (yang dengan mudah kita ketahui terletak di tengah tingginya). Sumbu referensi lain dapat saja kita gunakan, tetapi pemilihan sumbu berat sebagai sumbu referensi akan lebih berarti pada konteks analisis balok atau kolom karena dengan demikian kita akan mendapat I minimum penampangnya.



Gambar L-3-1 Momen inersia penampang segiempat

Solusi:

$$I_c = \int_A y^2\,dA$$

$$dA = b\,dy$$

maka

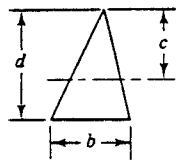
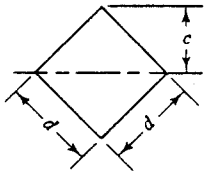
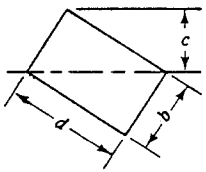
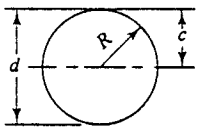
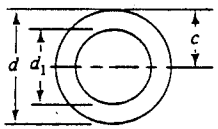
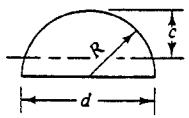
$$I_o = \int_{-h/2}^{+h/2} y^2(b\,dy) = b\left[\frac{y^3}{3}\right]_{-h/2}^{+h/2}$$

$$I_c = \frac{bh^3}{12}$$

Pada bentuk penampang tertentu, misalnya lingkaran, lebih mudah apabila kita menggunakan koordinat polar, bukan koordinat kartesian, dalam menghitung harga I.

Tabel L–3–1 memberikan harga-harga momen inersia untuk berbagai bentuk geometri yang umum.

TABEL A – 3 – 1 Besaran-besaran karakteristik penampang

Triangle 	Axis of moments through centroid $A = \frac{bd}{2}$ $c = \frac{2d}{3}$ $I = \frac{bd^3}{36}$ $S = \frac{bd^2}{24}$ $r = \frac{d}{\sqrt{18}}$	Square 	Axis of moments on diagonal $A = d^2$ $c = \frac{d}{\sqrt{2}}$ $I = \frac{d^4}{12}$ $S = \frac{d^3}{6\sqrt{2}}$ $r = \frac{d}{\sqrt{12}}$
Rectangle 	Axis of moments on diagonal $A = bd$ $c = \frac{bd}{\sqrt{b^2+d^2}}$ $I = \frac{b^3d^3}{6(b^2+d^2)}$ $S = \frac{b^2d^2}{6\sqrt{b^2+d^2}}$	Circle 	Axis of moments through center $A = \frac{\pi d^2}{4} = \pi R^2$ $I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi R^4}{4}$ $c = \frac{d}{2} = R$ $S = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi R^3}{4}$ $r = \frac{d}{4} = \frac{R}{2}$
Hollow circle 	Axis of moments through center $A = \frac{\pi(d^2-d_1^2)}{4}$ $c = \frac{d}{2}$ $I = \frac{\pi(d^4-d_1^4)}{64}$ $S = \frac{\pi(d^4-d_1^4)}{32d}$ $r = \frac{\sqrt{d^2+d_1^2}}{4}$	Half-circle 	Axis of moments through centroid $A = \frac{\pi R^2}{2}$ $c = R\left(1-\frac{4}{3\pi}\right)$ $I = R^4\left(\frac{\pi}{8}-\frac{8}{9\pi}\right)$ $S = \frac{R^3}{24}\left(\frac{9\pi^2-64}{3\pi-4}\right)$ $r = R\frac{\sqrt{9\pi^2-64}}{6\pi}$

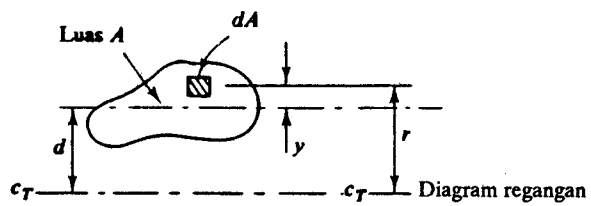
L.3.2 Terema Sumbu Sejajar

Apabila momen inersia suatu bentuk geometri terhadap suatu sumbu telah diketahui, kita dapat mencari dengan mudah momen inersia bentuk tersebut terhadap *sembarang* sumbu yang sejajar dengan sumbu semula. Hal ini sangat diperlukan dalam menghitung momen inersia suatu bentuk luas yang merupakan gabungan dari bentuk-bentuk dasar.

Perhatikan suatu luas yang terlihat pada Gambar L–3–2 yang mempunyai lokasi pusat berat c dan momen inersia I terhadap sumbunya. Momen inersianya terhadap sumbu lain yang sejajar dan mempunyai jarak d dengan sumbu tadi adalah

$$I_T = \int_A r^2\,dA = \int_A (y+d)^2\,dA$$

$$= \int_A y^2\,dA + 2d\int_A y\,dA + d^2\int_A dA$$



GAMBAR A–3–2 Momen inersia suatu luas terhadap sumbu yang berjarak d dari sumbu berat.

Suku pertama $\int_A y^2\,dA$ pada ekspresi di atas adalah momen inersia luas terhadap sumbu beratnya sendiri, I. Suku kedua $2d\int_A y\,dA$ sama dengan nol karena $\int_A y\,dA$ adalah nol, yang berarti momen pertama dari luas tersebut terhadap sumbu beratnya sendiri (pada pembahasan di atas telah disebutkan bahwa momen pertama dari suatu luas terhadap sumbu berat luas tersebut adalah nol). Suku terakhir $d^2\int_A dA$ dapat kita tulis secara lebih ringkas, yaitu d^2A di mana A adalah luas totalgambar yang dimaksud. Jadi, ekspresi yang kita peroleh adalah:

$$I_T = \bar{I} + Ad^2$$

Dengan demikian, momen inersia suatu luas terhadap sembarang sumbu pada bidang yang sama, sama dengan momen inersia luas itu terhadap titik beratnya ditambah suku transfer yang dihitung sebagai hasil kali antara kuadrat jarak antara sumbu-sumbu tersebut dan luas tersebut. Dari sini jelaslah bahwa *momen inersia minimum dari suatu gambar* (luas) adalah yang terhadap sumbu beratnya. Karena itulah sumbu berat sering digunakan sebagai sumbu referensi pada perhitungan rekayasa.

Momen inersia dari setiap luas yang membentuk suatu bentuk gabungan dapat digabungkan secara langsung hanya jika masing-masing sumbu beratnya berimpit

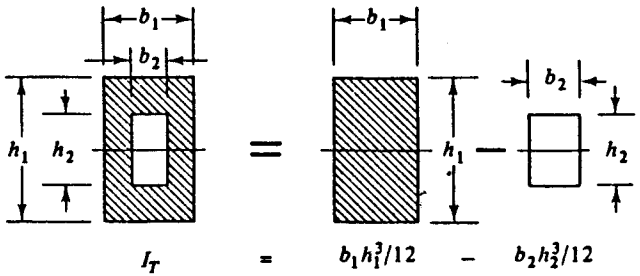
dengan sumbu berat bentuk totalnya. Pada situasi demikian, $d = 0$ untuk masing-masing bentuk luas; dengan demikian $I = \Sigma (I + Ad^2) = \Sigma (I)$.

L.3.3 Luas Negatif

Pada banyak bentuk simetris akan lebih mudah apabila kita menguraikan bentuk tersebut menjadi bentuk-bentuk yang dapat merupakan luas positif dan negatif. Luas *positif* menambah luas aktual gambar dan mempunyai kontribusi secara positif terhadap momen inersia gambar smeula, sedangkan luas negatif mempunyai efek sebaliknya. Hal ini merupakan pilihan lain tinjauan dari apa yang telah kita bahas sebelum ini.

CONTOH

Tentukanlah momen inersia bentuk penampang melintang yang terlihat pada Gambar L–3–3. Anggap bahwa b_1 = 10 in. (254 mm), h_1 = 10 in. (254 mm), b_2 = 8 in. (203,2 mm), dan h_2 = 6 in. (152,4 mm). Perhatikan bahwa $d_1 = d_2 = 0$ sehingga $I = \Sigma (I)$.



Gambar L-3-3 Lubang pada penampang melintang segiemat simetris dapat dipandang sebagai luas negatif dan mempunyai momen inersia negatif.

Solusi:

$$I_T = I_{positif} - I_{negatif}$$

$$= \frac{10 \text{ in.} \times (10 \text{ in.})^3}{12} - \frac{8 \text{ in.} \times (6 \text{ in.})^3}{12}$$

$$= 689 \text{ in.}^4$$

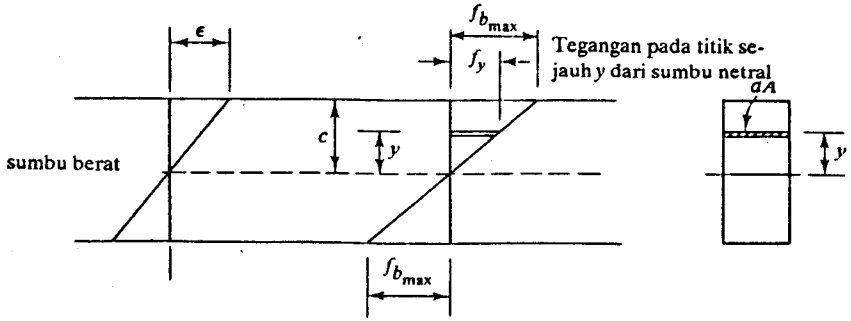
$$= \frac{(254 \text{ mm}) \times (254 \text{ mm})^3}{12} - \frac{(203{,}2 \text{ mm}) \times (152{,}4 \text{ mm})^3}{12}$$

$$= 286.900 \times 10^3\text{-mm}^4$$

LAMPIRAN 4: TEGANGAN LENTUR PADA BALOK

Pokok bahasan pada Lampiran 4 ini adalah mengenai hubungan antara momen lentur **eksternal** yang ada di suatu penampang balok, besaran-besaran balok, dan tegangan lentur yang timbul pada penampang tersebut sebagai respons terhadap momen lentur eksternal. Prinsip dasar yang digunakan dalam menurunkan hubungan tersebut adalah bahwa aksi tegangan lentur adalah unuk menghasilkan momen tahanan internal M_R yang mengimbangi momen eksternal M_E pada penampang yang dimaksud.

Perhatikan balok yang diperlihatkan pada Gambar L–4–1. Seperti telah disebutkan pada Bab 6, efek lentur menyebabkan terjadinya deformasi serat-serat balok seperti terlihat pada Gambar L–4–1. Perlu dicatat bahwa bidang yang deformasinya dan tegangannya nol (yaitu *sumbu netral*) belum kita ketahui lokasinya. Mencari lokasi bidang ini perlu dilakukan untuk analisis selanjutnya. Lokasi tersebut dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan balok dalam arah horizontal. Mula-mula kita harus mencari gaya resultan tegangan yang bekerja secara horizontal.



Gambar L-4-1 Tegangan lentur pada balok

Misalkan tegangan maksimum yang terjadi di lokasi sejauh c dari sumbu netral kita sebut $f_{b_{maks}}$. Tegangan f_y yang terjadi pada lokasi sejauh y dari sumbu netral dapat diperoleh dengan menggunakan $f_y/y = f_{b_{maks}}/c$ atau $f_y = (y/c)(f_{b_{maks}})$. Pada lokasi sejauh y tersebut, terdapat gaya akibat tegangan f_y, yaitu $f_y\,dA$. Telah pula kita ketahui bahwa $\Sigma F_x = 0$. Apabila tidak ada gaya horizontal eksternal yang bekerja pada balok tersebut, maka gaya total yang dihasilkan oleh komponen-komponen tarik dan tekan di seluruh bagian penampang haruslah sama dengan nol. Dengan demikian, $\int_A f_y\,dA = 0$. Apabila f_y kita nyatakan dalam tegangan maksimum (pada serat terluar balok), maka kita peroleh $(f_{b_{maks}}/c) \int_A y\,dA = 0$. Karena f_b maks/c) tidak dapat berharga nol, maka haruslah $\int_A y,\,dA = 0$. Besaran $\int_y dA$ disebut *momen pertama* dari luas penampang balok terhadap sumbu netralnya. Suku dengan bentuk umum seperti ini tidak hanya sering dijumpai pada buku-buku matematika, tetapi juga sangat penting diketahui dalam mempelajari balok. Uraian lebih lengkap dapat dipelajari pada Lampiran 2. Di sana juga dapat dipelajari konsep me-

ngenai *pusat berat* suatu luas [yaitu titik di mana suatu bentuk geometri dapat dipandang seimbang (cara lain untuk menyebutkan bahwa $\int_A y\, dA = 0$)]. Untuk pembahasan kita saat ini, hal penting yang perlu diingat adalah $\int_A y\, dA = 0$ menunjukkan sumbu berat suatu bentuk geometri dan dapat langsung dihitung untuk berbagai bentuk penampang balok. Dalam konteks analisis balok, suku $\int_A y\, dA = 0$ mengandung arti bahwa sumbu netral balok sama dengan sumbu berat penampang melintangnya.

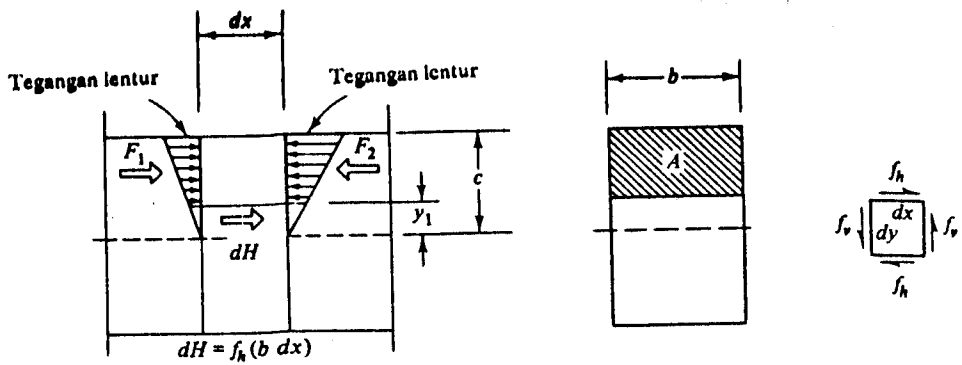
Kita akan mulai melakukan proses mencari hubungan antara tegangan lentur, besaran penampang, dan momen lentur yang bekerja. Telah disebutkan di atas bahwa jumlah gaya yang diakibatkan oleh tegangan pada arah horizontal harus sama dengan nol berdasarkan tinjauan keseimbangan $\Sigma F_x = 0$. Perhatikan bahwa $\Sigma M = 0$ juga harus terpenuhi. Jadi, momen yang diakibatkan oleh gaya-gaya (dari tegangan tadi) terhadap sumbu netral harus sama dengan momen eksternal yang bekerja. Momen akibat gaya (dari tegangan) terhadap sumbu netral adalah $y\ (f_y\, dA)$ atau $y(f_{b_{maks}})(y/c)\, dA$. Jadi, jumlah momen akibat semua gaya adalah $(f_{b_{maks}}/c) \int_A y^2\, dA$. Momen ini adalah momen tahanan M_R yang harus sama besar dan berlawanan arah dengan momen eksternal M_E. Dengan demikian, $M = (f_{b_{maks}}/c) \int_A y^2\, dA$. Suku $\int_A y^2\, dA$ umum disebut sebagai *momen kedua* suatu luas (pada konteks matematika), juga disebut sebagai *momen inersia I* (pada konteks rekayasa). Pada umumnya suku ini merupakan deskripsi distribusi material pada penampang melintang suatu balok dan menunjukkan karakteristik kekakuan balok. Suku ini dapat dihitung untuk setiap bentuk penampang (lihat Lampiran 3).

Ekspresi terakhir yang diuraikan di sini adalah ekspresi yang menghubungkan tegangan lentur maksimum ($f_{b_{maks}}$) dengan besaran karakteristik penampang melintang (yang didefinisikan dengan $I = \int_A y^2\, dA$, yaitu momen inersia terhadap sumbu netral penampang) dan momen M yang ada pada penampang. Ekspresi yang dimaksud adalah $f_{b_{maks}} = Mc/I$. Tegangan pada lokasi sejauh y dari sumbu netral dapat dihitung dengan menggunakan ekspresi $f_y = My/I$.

LAMPIRAN 5: TEGANGAN GESER PADA BALOK

Sebagaimana telah disebutkan pada Bab 6.3.2, tegangan geser dapat terjadi pada balok yang dibebani. Pada Lampiran 5 ini kita akan menurunkan hubungan yang ada antara karakteristik fisik balok, gaya-gaya yang bekerja padanya, dan tegangan geser yang timbul pada balok. Kita akan mempelajari *tegangan geser horizontal* dulu.

Perhatikan elemen kecil tak hingga dari sebuah balok seperti terlihat pada Gambar L–5–1. Sebagaimana yang umum terjadi pada balok yang dibebani, momen lentur, dan tentu saja juga tegangan lentur, pada suatu penampang akan lebih besar dibandingkan dengan pada penampang lainnya. Agar keseimbangan gaya dalam arah horizontal terpenuhi, harus ada gaya horizontal seperti terlihat pada Gambar L–5–1 untuk mengimbangi gaya-gaya horizontal yang dihasilkan oleh lentur di kedua penampang. Apabila f_h menunjukkan tegangan geser rata-rata pada luas yang sangat



Tegangan geser horizontal mengimbangi perbedaan antara F_1 dan F_2

Gambar L-5-1 Tegangan geser horizontal pada balok

kecil sepanjang dx dengan lebar b, dan apabila kita menyatakan gaya-gaya lentur sebagai tegangan lentur yang bekerja pada balok, maka tinjauan keseimbangan dalam arah horizontal adalah:

$$\underbrace{f_h(b\, dx)}_{dH} = \underbrace{\int_{y_1}^{c} \left(\frac{M_2 y}{I}\right) dA}_{F_2} - \underbrace{\int_{y_1}^{c} \left(\frac{M_1 y}{I}\right) dA}_{F_1}$$

atau dengan menuliskan bahwa $M_2 - M_1$ menunjukkan perbedaan momen di antara dua penampang yang berjarak dx, maka:

$$f_h = \frac{dM}{Ib\, dx} \int_{y_1}^{c} y\, dA$$

Pada Bab 2.4.5 dituliskan bahwa $dM/dx = V$ (gaya geser vertikal), jadi:

$$f_h = \frac{V}{Ib} \int_{y_1}^{c} y\, dA$$

Integral $\int_{y_1}^{c} y\, dA$ adalah momen pertama dari bagian penampang di atas *potongan horizontal yang sedang ditinjau* (di mana tegangan geser horizontal pada ekspresi di atas bekerja) terhadap sumbu netral balok. Integral ini umum disebut dengan Q. Dengan demikian:

$$f_h = \frac{VQ}{Ib}$$

Ini adalah ekspresi umum tegangan geser horizontal yang terjadi di sembarang penampang balok. Perhatikan bahwa tegangan geser maksimum terjadi pada titik

di mana $\int_{y_1}^{c} y\,dA$ mencapai maksimum. Hal ini terjadi apabila potongan horizontal yang ditinjau berimpit dengan sumbu netral.

Pada balok segiempat, distribusi tegangan geser dapat diperoleh dengan menulis-kan ekspresi umum tegangan geser untuk lapisan yang berjarak y dari sumbu netral.

Untuk balok segiempat:

$$Q = \int_{y_1}^{c} y\,dA = \bar{y}A = \left[b\left(\frac{h}{2} - y\right)\right]\left[y + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{2} - y\right)\right]$$

Jadi,

$$f = \frac{VQ}{Ib} = \frac{V}{2I}(h^2/4 - y^2)$$

Ekspresi ini menunjukkan bahwa tegangan geser terdistribusi secara parabolik pada tinggi penampang. Jelas bahwa tegangan geser maksimum terjadi pada $y = 0$ (yaitu pada sumbu netral).

Di setiap titik pada balok, tegangan geser horizontal selalu disertai dengan te-gangan geser vertikal yang sama, f_v. Hal ini dapat dibuktikan dengan berbagai cara. Cara yang paling mudah adalah dengan meninjau keseimbangan potongan kecil balok seperti terlihat pada Gambar L–4–1 yang hanya mengalami gaya geser. Dengan menjumlahkan momen-momen akibat gaya yang merupakan resultan dari tegangan geser yang berkerja pada potongan balok tersebut kita peroleh:

$$f_h(dx\,dz)\,dy - f_v(dy\,dz)(dx) = 0$$

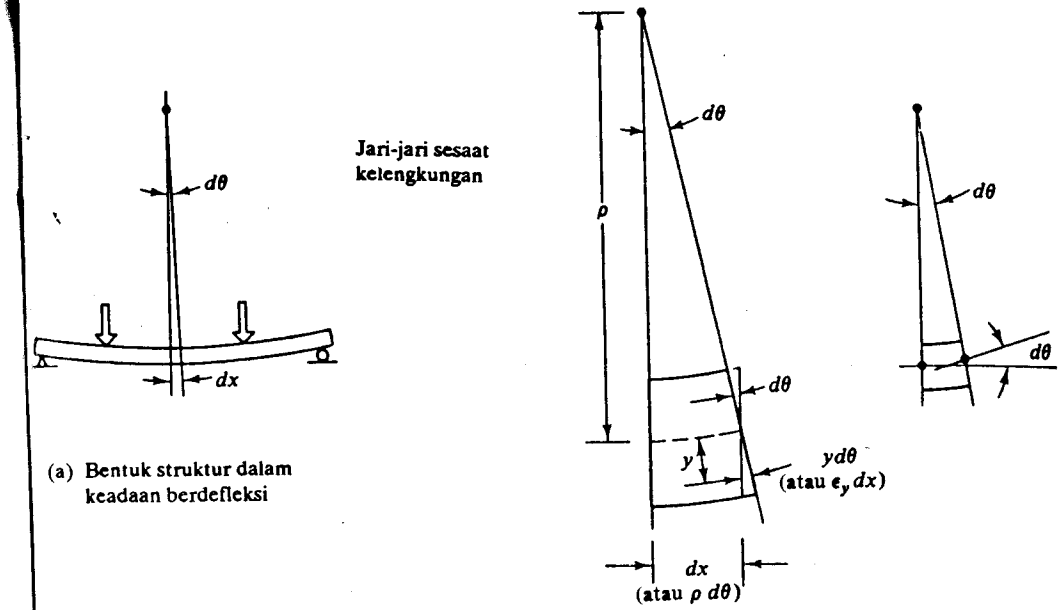
$$f_h = f_v$$

Tegangan geser vertikal inilah yang sebenarnya membentuk gaya geser tahanan $V_R = \int f_v\,dA$. Gaya geser tahanan ini mengimbangi gaya geser eksternal yang bekerja, V_E. karena $f_h = f_v$, maka distribusi tegangan geser vertikal pada muka penampang melintang ditentukan oleh distribusi tegangan geser horizontal. Hanya dengan cara demikian kita dapat memperoleh distribusi tegangan geser vertikal pada penampang balok.

LAMPIRAN 6: HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN

Pada bagian ini kita akan membahas hubungan yang ada di antara momen pada suatu titik dan kelengkungan elemen struktur pada titik yang sama. Momen menyebabkan terjadinya lenturan pada struktur. Semakin besar momen tersebut, akan semakin besar pula lenturan yang diakibatkannya. Bagaimana hubungan sebenarnya akan di-bahas pada bagian ini.

Perhatikan potongan kecil dari suatu balok yang mengalami lentur (lihat Gambar L–6–1). Anggap bahwa bidang yang semula datar pada balok akan tetap datar pada saat melentur. Dengan demikian, dua bidang yang berdekatan (mempunyai jarak sebesar do) pada saat balok melentur akan mengalami rotasi relatif sebesar $d\theta$.



(a) Bentuk struktur dalam keadaan berdefleksi

(b) Kelengkungan pada satu potongan

Gambar L-6-1 Hubungan momen-kelengkungan: $1/\rho = M/EI$.

Serat-serat di bagian atas balok akan memendek, sedangkan yang di bagian bawah akan memanjang. Perpanjangan serat yang terletak sejauh y dari bidang netral (bidang horizontal yang mempunyai deformasi nol) dapat diperoleh dengan meninjau lokasi semula kedua bidang. Perpanjangan ini adalah busur lingkaran yang mempunyai jari-jari y dan dibatasi sudut $d\theta$. Jadi, perpanjangannya adalah $y\,d\theta$.

Apabila panjang elemen balok sebelum berdeformasi adalah dx dan regangan (deformasi per satuan panjang) pada y adalah ϵ_y, maka $y\,d\theta = \epsilon_y\,dx$, atau $\epsilon_y = y\,(d\theta/dx)$, atau $(d\theta/dx) = \epsilon_y/y$.

Dengan memperhatikan Gambar L–6–1 jelaslah bahwa jari-jari kelengkungan ρ dan dx mempunyai hubungan berbentuk $dx = \rho\,d\theta$ karena panjang dx pada penam-pang tengah adalah busur lingkaran yang berjari-jari ρ dan dibatasi sudut $d\theta$. Hubung-an ini dapat ditulis pula dalam bentuk $(d\theta/dx) = 1/\rho$.

Dengan menyamakan kedua ekspresi untuk $d\theta/dx$, kita peroleh:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_x}{y} \quad \text{atau} \quad \epsilon_y = \frac{y}{\rho}$$

Hubungan antara tegangan dan regangan untuk material elastis homogen berbentuk $E = f_y/\epsilon_y$ di mana E adalah modulus elastisitas material dan f_y adalah tegangan di suatu titik. Hubungan tersebut dapat pula ditulis dalam bentuk $\epsilon_y = (1/E)\,f_y$. Pada Lampiran 4 telah kita peroleh bahwa tegangan lentur $f_y = M_y/I$. Dengan demikian, $\epsilon_y = (1/E)\,(M_y/I)$ atau $y/\rho = (1/E)\,(M_y/I)$. Jadi:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

Ini adalah hubungan *momen-kelengkungan*. Kelengkungan $(1/\rho)$ berbanding lurus dengan momen (M) pada elemen struktur dan berbanding terbalik dengan hasil kali modulus elastisitas (E) dan momen inersia (I) elemen struktur. Perhatikan bahwa apabila $M = 0$, maka $\rho \to \infty$, yang berarti elemen struktur tersebut lurus (seperti memang seharusnya terjadi pada elemen struktur yang momennya nol). Apabila momennya semakin besar, maka jari-jari kelengkungan menjadi lebih kecil, yang berarti bahwa elemen struktur semakin lengkung pada saat dibebani.

LAMPIRAN 7: DEFLEKSI

L.7.1 Persamaan Diferensial Umum

Ekspresi $1/\rho = M/EI$ yang kita peroleh pada Lampiran 6 dapat pula dinyatakan dalam lendutan elemen struktur. Karena momen (M) pada elemen struktur umumnya berubah-ubah di sepanjang elemen struktur, maka jari-jari sesaat kelengkungan juga akan berubah-ubah, yang berarti kelengkungan di sepanjang elemen struktur tersebut tidak seragam. Apabila kurva lendutan didefinisikan sebagai $y = y(x)$, maka dari kalkulus kita ketahui bahwa:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(d^2y/dx^2)}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}}$$

Ekspresi dy/dx adalah kemiringan elemen struktur di suatu titik. Untuk lendutan kecil, kuadrat suku ini dapat kita abaikan. Dengan demikian:

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{d^2y}{dx^2}$$

Sehingga

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad \text{atau} \quad M = \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right) EI$$

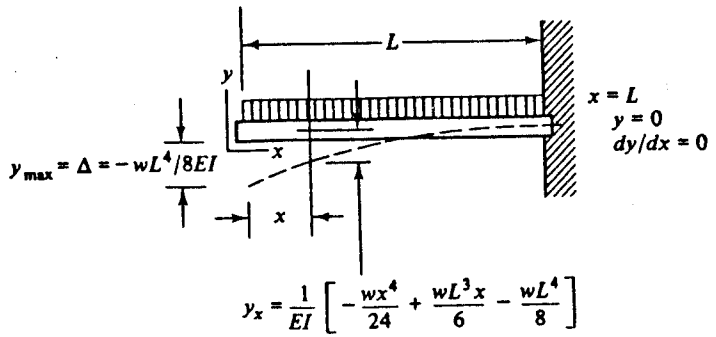
Ini adalah persamaan diferensial dasar untuk kurva lendutan elemen struktur yang mengalami lentur.

L.7.2 Defleksi: Metode Integrasi – Rangkap

Defleksi balok di sembarang titik dapat dicari dengan menggunakan aplikasi langsung dari hasil di atas $(d^2y/dx^2 = M/EI)$.

CONTOH

Tinjaulah balok kantilever yang terlihat pada Gambar L–7.1, dan anggaplah bahwa kita ingin mengetahui defleksi di ujung balok tersebut. Anggap bahwa E dan I konstan di sepanjang balok.



Gambar L-7-1 Defleksi pada balok yang dibebani merata

Solusi:

Momen di x diberikan oleh $M_x = -wL^2/2$. Dengan demikian:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = \frac{1}{EI}\left(-\frac{wx^2}{2}\right)$$

Persamaan ini dapat diintegrasikan satu kali sehingga menghasilkan:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{EI}\left(-\frac{wx^3}{6} + C_1\right)$$

di mana C_1 adalah konstanta integrasi. Konstanta ini dapat dihitung besarnya dengan menggunakan kondisi batas bahwa kemiringan balok, dy/dx, adalah nol pada $x = L$. Dengan demikian, diperoleh $C_1 = wL^3/6$. Jadi:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI}\left(-\frac{wx^3}{6} + \frac{wL^3}{6}\right)$$

Ini adalah persamaan kemiringan di titik x sembarang. Dengan mengintegrasikan satu kali lagi,

$$y = \frac{1}{EI}\left(-\frac{wx^4}{24} + \frac{wL^3x}{6} + C_2\right)$$

di mana C_2 adalah konstanta integrasi kedua. Konstanta ini dapat dicari dengan menggunakan kondisi bahwa $y = 0$ pada $x = L$. Dengan demikian, diperoleh $C_2 = -wL^4/8$.

$$y = \frac{1}{EI}\left(-\frac{wx^4}{24} + \frac{wL^3x}{6} - \frac{wL^4}{8}\right)$$

Ini adalah persamaan dasar lendutan balok tersebut. Defleksi maksimum terjadi pada $x = 0$, yaitu:

$$y_{max} = -\frac{wL^4}{8EI}$$

Perhatikan bahwa kondisi batas sangat penting untuk diketahui dan harus digunakan secara hati-hati.

Defleksi untuk kondisi beban lainnya, juga pada sembarang struktur lain, dapat dicari dengan cara serupa. Perhatikan bahwa apabila E dan I tidak konstan, kita harus menuliskannya sebagai fungsi dari x.

LAMPIRAN 8: TEOREMA LUAS-MOMEN: KEMIRINGAN DAN DEFLEKSI

Teorema moment-area (luas momen) merupakan salah satu cara yang sangat penting dalam analisis struktur. Pada Lampiran 6 kita telah menurunkan hubungan momen kelengkungan, $1/\rho = M/EI$. Dengan memperhatikan Gambar L–6–1, terlihat jelas bahwa $d\theta/dx = 1/\rho$. Dengan demikian, dapat kita tuliskan:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{M}{EI} \quad \text{atau} \quad d\theta = \left(\frac{M}{EI}\right) dx$$

Dengan memperhatikan Gambar L–6–1, terlihat pula bahwa $d\theta$ juga menunjukkan perubahan sudut antara dua titik pada struktur. Dengan demikian, ekspresi $d\theta = (M/EI)\,dx$ menyatakan bahwa perubahan kemiringan pada jarak dx sama dengan $(M/EI)\,dx$. Jadi, perubahan total kemiringan antara titik A dan B adalah:

$$\theta_B - \theta_A = \int_A^B \left(\frac{M}{EI}\right) dx$$

Inilah yang disebut teorema pertama luas momen. *Perubahan kemiringan antara dua garis singgung pada balok di dua titik sama dengan luas diagram M/EI di antara kedua titik tersebut.*

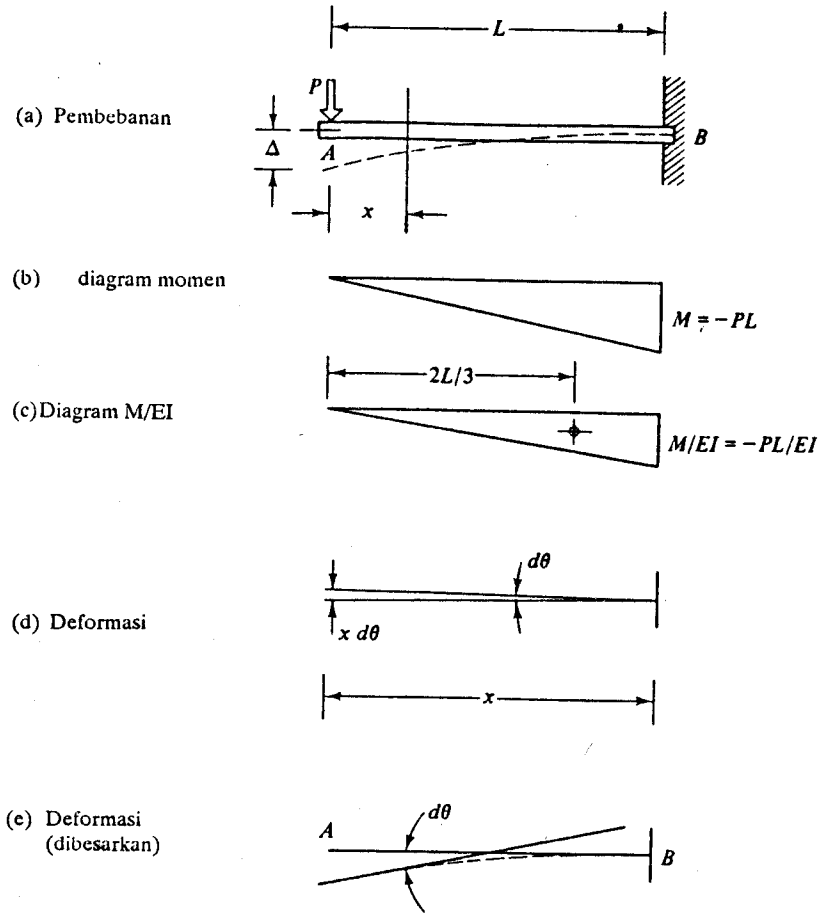
Teorema luas momen sangat berkaitan dengan masalah lendutan (defleksi). Pada struktur yang mengalami lendutan kecil, pada umumnya deviasi ($d\Delta$) suatu titik terhadap garis singgung yang digambar melalui titik lain yang jaraknya x dari titik petama adalah $d\Delta = (Mx/EI)\,dx$. Perubahan total antara titik A dan B adalah:

$$\Delta_B - \Delta_A = \int_A^B \left(\frac{Mx}{EI}\right) dx$$

Dengan perkataan lain, *deviasi garis singgung suatu kurva defleksi di sebuah titik terhadap garis singgung di titik lain sama dengan momen pertama dari diagram M/EI di antara kedua titik terhadap titik di mana deviasinya dicari.*

CONTOH

Perhatikan balok yang terlihat pada Gambar L–8–1. Carilah kemiringan dan defleksi ujungnya dengan menggunakan teorema luas momen.



Gambar L-8-1 Aplikasi teorema luas momen

Solusi:

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menggambarkan diagram momennya, Perubahan kemiringan dari A ke B didapat dari:

$$\theta_B - \theta_A = \int_A^B \left(\frac{M}{EI}\right) dx = \frac{1}{EI}\int_0^L (-Px)\,dx$$

$$= -\frac{P}{EI}\left[\frac{x^2}{2}\right]_0^L$$

Karena $\theta_B = 0$, maka:

$$\theta_A = +\frac{PL^2}{2EI} \quad \text{(radians)}$$

Dalam hal ini, sudut diperoleh juga merupakan kemiringan bebas terhadap sumbu horizontal karena $\theta_B = 0$. Defleksi di ujung bebas dapat dihitung dengan menggunakan teorema luas momen. Karena garis singgung balok di B adalah horizontal, maka ekspresi deviasi titik A terhadap garis singgung di titik B akan berimpit dengan defleksi absolut balok terhadap sumbu horizontal (sumbu semua balok). Jadi:

$$y_{max} = \Delta_B - \Delta_A = \int_A^B \left(\frac{M}{EI}\right) x\,dx = \frac{1}{EI}\int_0^L (-Px)\,x\,dx$$

$$= -\frac{PL^3}{3EI}$$

Meskipun ekspresi luas momen dapat diintegrasi secara langsung seperti diilustrasikan di atas, lebih mudah kalau kita menghitung luas dan momen pertama dari diagram M/EI secara langsung. Jadi:

$$\theta = \left(\frac{PL}{EI}\right)(L)\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{PL^2}{2EI}$$

$$y_{max} = \Delta_B - \Delta_A = \left(\frac{PL}{EI}\right)(L)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{2L}{3}\right) = \frac{PL^3}{3EI}$$

Contoh ini agak mudah karena kita telah mengetahui θ_B adalah horizontal dan Δ_B *nol.*

CONTOH

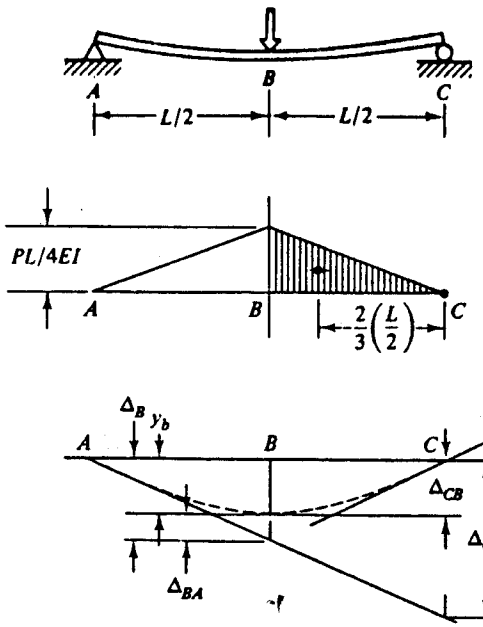
Carilah defleksi balok pada Gambar A–8–2 di titik tengah bentang.

Solusi:

Mula-mula kita menggambar diagram momen akibat beban yang tergambar. Dalam hal ini kemiringan garis singgung di kedua tumpuan tidak sama dengan nol, tetapi kemiringan garis singgung di tengah bentang haruslah nol karena alasan simetri. Dengan demikian, deviasi titik C dari garis singgung kurva elastis di B sama dengan defleksi total di titik B. Jadi, kita peroleh:

$$\Delta_{CB} = \underbrace{\left(\frac{PL}{4EI}\right)\left(\frac{L}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)}_{(M/EI)\text{ luas}}\underbrace{\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{L}{2}\right)}_{\text{lengan momen terhadap } C}$$

$$= \frac{PL^3}{48EI} = \text{ defleksi di } b\ (y_b)$$



(a) Pembebanan

(b) Diagram M/EI

(c) Deformasi

Gambar L-8-2 Aplikasi teorema momen luas

Untuk pembebanan lain yang lebih rumit, kemiringan balok di tengah bentang tidak sama dengan nol. Untuk itu kita harus menggunakan prosedur umum berikut ini (lihat Gambar L–8–2). Δ_{CA} dan Δ_{BA} dihitung dulu dengan menggunakan teorema momen luas. Selanjutnya, dengan menggunakan perbandingan segitiga kita peroleh Δ_B. Jadi, defleksi balok di titik B adalah $y_B = \Delta_B - \Delta_{BA}$.

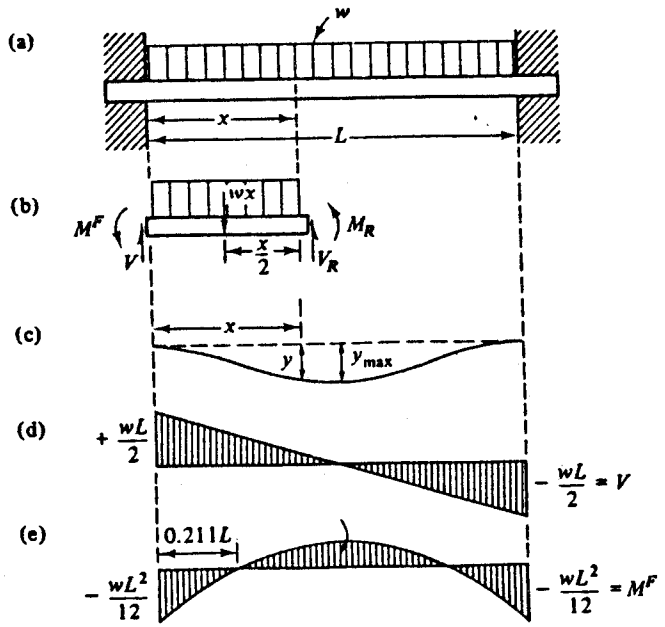
LAMPIRAN 9: METODE INTEGRASI RANGKAP UNTUK ANALISIS STRUKTUR STATIS TAK TENTU

Pada bagian ini dibahas salah satu cara analisis struktur yang dewasa ini tidak banyak digunakan. Sekalipun demikian, secara *konseptual* pembahasan di sini cukup menarik, merupakan perluasan dan aplikasi langsung dari formulasi-formulasi yang telah dibahas pada bagian sebelum ini.

Metode integrasi rangkap didasarkan atas hubungan momen kelengkungan yang telah dibahas pada Lampiran 6. Pada contoh berikut ini, momen yang ada di ujung balok terjepit dipandang sebagai sesuatu yang tak diketahui (anu) pada persamaan diferensial dasar kurva lendutan balok (lihat Lampiran 7). Momen yang tak diketahui ini dapat dipecahkan dengan mengintegrasikan persamaan diferensial serta memasukkan kondisi-kondisi batas yang ada.

CONTOH

Perhatikan balok berujung jepit-jepit yang terlihat pada Gambar L–9–1. Carilah momen yang timbul di masing-masing tumpuan.



Gambar L-9-1 Aplikasi metode integrasi rangkap pada analisis struktur

Solusi:

Bentuk persamaan diferensial lendutan balok secara umum adalah:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M$$

Untuk contoh soal ini kita substitusikan:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M^F + \frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}$$

Ekspresi di atas kita integrasikan satu kali sehingga:

$$EI\frac{dy}{dx} = M^F x + \frac{wLx^2}{4} - \frac{wx^3}{6} + C_1$$

Karena kemiringan balok di tumpuan berarah horizontal, maka berarti $dy/dx = 0$ di $x = 0$. Dengan demikian, $C_1 = 0$. Begitu pula $dy/dx = 0$ untuk $x = L$. Jadi:

$$0 = M^F L + \frac{wL^3}{4} - \frac{wL^3}{6}$$

$$M^F = -\frac{wL^2}{12}$$

Ini adalah momen yang timbul di kedua tumpuan. Dengan menggunakan momen ini kita dapat menghitung momen di seluruh bagian struktur dengan menggunakan tinjauan keseimbangan. Momen di tengah bentang, misalnya dapat dibuktikan sebesar $M = wL^2/24$. Perhatikan bahwa contoh ini, momen inersia (I) balok diasumsikan konstan di sepanjang bentang balok. Apabila tidak konstan, maka I harus dinyatakan sebagai fungsi dari x dan dimasukkan ke dalam integrasi. Dengan demikian, momen yang diperoleh tidak lagi $M = -wL^2/32$. Hal ini mengilustrasikan bahwa momen pada balok menerus bergantung pula pada momen inersia. Variasi modulus elastisitas E juga mempengaruhi nilai momen.

Apabila kita ingin mengetahui lendutan di tengah bentang balok, kita dapat langsung menggunakan nilai momen di tumpuan yang telah kita peroleh. Jadi:

$$EI\frac{dy}{dx} = -\frac{wL^2x}{12} + \frac{wLx^2}{4} - \frac{wx^3}{6}$$

$$EIy = -\frac{wL^2x^2}{24} + \frac{wLx^3}{12} - \frac{wx^4}{24} + C_2$$

Karena $y = 0$ pada $x = 0$, maka $C_2 = 0$.

$$EIy = -\frac{wL^2x^2}{24} + \frac{wLx^3}{12} - \frac{wx^4}{24}$$

Karena struktur beserta bebannya simetris, jelas bahwa defleksi maksimum akan terjadi di tengah bentang, yaitu:

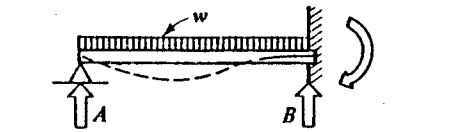
$$\Delta = y_{max} = -\frac{wL^4}{384EI}$$

Dengan metode integrasi rangkap, secara konseptual kita dapat melakukan analisis struktur seperti di atas. Untuk keadaan lain yang tidak khusus (misalnya tidak simetris dan semakin banyak redundan), metode ini menjadi tidak praktis. Oleh karena itu, biasanya digunakan metode analisis yang lain.

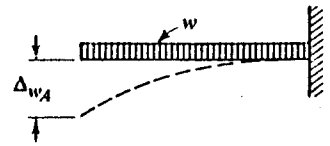
LAMPIRAN 10: METODE DEFLEKSI UNTUK ANALISIS STRUKTUR STATIS TAK TENTU

Pada metode defleksi untuk analisis struktur kita harus mengisolasi satu (atau lebih) tumpuan redundan, yaitu secara konseptual membuang tumpuan redundan dan membolehkan struktur tersebut berdefleksi secara bebas (jadi, membuat struktur statis tertentu), menentukan. defleksi di titik tumpuan, dan menghitung besar gaya yang diperlukan untuk mengembalikan struktur yang berdeformasi bebas tadi ke kondisi semula. Gaya (atau momen) yang diperlukan untuk mengembalikan bentuk struktur semula tersebut ekuivalen dengan reaksi yang umumnya timbul di titik tersebut.

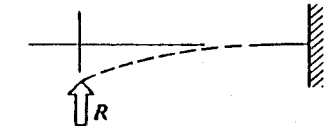
Perhatikan struktur pada Gambar L–10–1 beserta bentuk terdefleksinya. Apabila tumpuan A dihilangkan, struktur tersebut menjadi statis tertentu dan akan mempunyai bentuk defleksi seperti tergambar. Defleksi bebas (Δ_{wA}) di A yang diakibatkan oleh beban w dapat dicari dengan menggunakan metode yang telah diuraikan di atas. Apabila gaya ke atas dikerjakan pada ujung bebas dari struktur yang dapat berdefleksi bebas, gaya ini harus mempunyai arah yang mengurangi defleksi tersebut. Jelas bahwa gaya (R), yang besarnya belum kita ketahui, harus dapat mengembalikan posisi ujung bebas ke posisi, semula (yaitu posisi sebelum tumpuan tersebut dihilangkan). Gaya ini ekuivalen dengan gaya reaksi yang terjadi di titik tumpuan tersebut karena efeknya terhadap struktur sama.



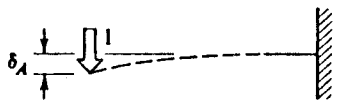
(a) Balok yang dibebani terbagi rata



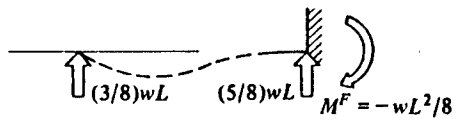
(b) Defleksi pada ujung bebas apabila tumpuannya dihilangkan



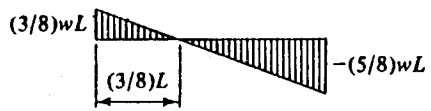
(c) Gaya sebesar R harus ada agar ujung bebas kembali ke posisi semula. Gaya ini ekuivalen dengan reaksinya yang sebenarnya terjadi.



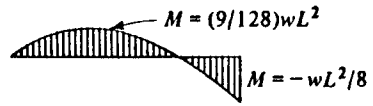
(d) Gaya R dapat diperoleh dengan menghitung defleksi akibat beban satuan dan menggunakan $R = -\Delta_{wA}/\delta_A$



(e) Reaksi



(f) Diagram geser



(g) Diagram momen

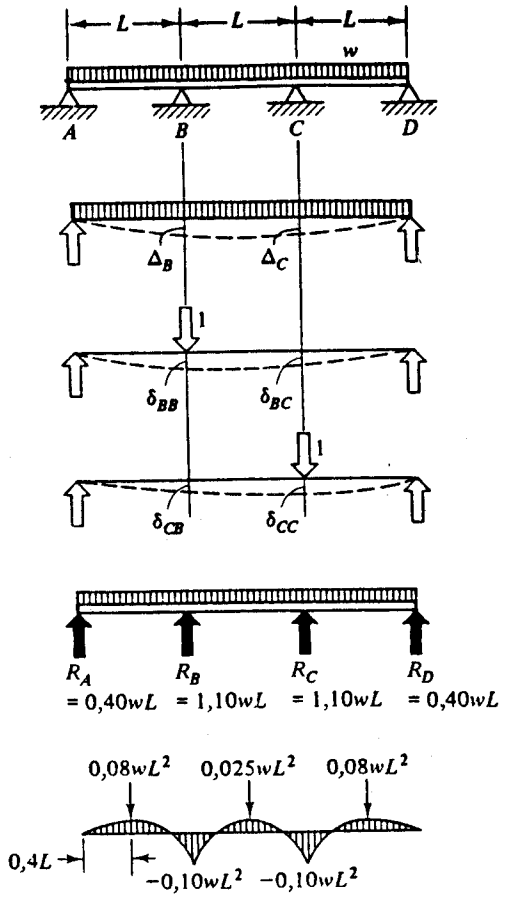
Gambar L-10-1 Metode defleksi untuk analisis struktur

Apabila defleksi di titik A yang diakibatkan oleh gaya R di ujung bebas balok kantilever dinyatakan dalam Δ_{RA} dan defleksi di A pada ujung bebas balok kantilever akibat beban terbagi rata dinyatakan sebagai Δ_{wA}, maka $\Delta_{RA} + \Delta_{wA} = 0$. Ini adalah syarat keserasian (kompatibilitas) defleksi. Hal ini didasarkan atas fakta bahwa defleksi akibat berbagai beban pada suatu elemen struktur dapat dijumlahkan. Pernyataan ini juga dapat dipakai untuk mencari gaya reaksi R yang diperlukan agar kondisi defleksi di A pada struktur aktual adalah nol. Cara termudah untuk mendapat gaya tesebut adalah dengan mencari terlebih dulu defleksi di A yang diakibatkan oleh beban satuan ($P = 1$) di ujung balok. Apabila defleksi di A yang diakibatkan oleh beban satuan ini disebut δ_A, maka defleksi yang diakibatkan oleh gaya R di lokasi yang sama adalah $R(\delta_A)$. Hal ini dengan mengingat bahwa defleksi bergantung linear pada besar beban yang ada selama materialnya masih berada dalam daerah elastis dan defleksinya kecil.

Syarat keserasian defleksi di titik A pada struktur aktual adalah $\Delta_{RA} + \Delta_{wA} = 0$, atau juga $R(\delta_A) + \Delta_{wA} = 0$. Jadi, $R = -\Delta_{wA}/\delta_A$. Dengan demikian, kita memperoleh bahwa gaya reaksi R adalah perbandingan defleksi akibat beban eksternal dan defleksi akibat beban satuan di mana kedua defleksi tersebut dihitung pada struktur yang tumpuannya dihilangkan.

Kedua lendutan itu dapat dengan mudah kita hitung. Dengan menggunakan metode yang telah disebutkan pada lampiran sebelum ini, defleksi balok kantilever yang dibebani terbagi rata adalah $\Delta_{wA} = -wL^4/8EI$. Untuk balok kantilever yang memikul beban terpusat P di ujung bebasnya, $\Delta = PL^3/3EI$. Apabila $P = 1$ (dalam hal beban satuan), maka $\delta_A = (1)L^3/3EI$. Jadi, $R = -(wL^4/8EI)/[(1)L^3/3EI] = -3/8wL$. Gaya ini ekuivalen dengan reaksi di A karena kedua-duanya mempunyai efek yang sama terhadap struktur, yaitu menjadikan defleksi di A sebesar nol. Berdasarkan informasi reaksi di A ini kita dapat mencari reaksi lain dengan menggunakan $\Sigma F_y = 0$.

Kita dapat melakukan proses yang sama pada struktur yang mempunyai redundan lebih dari satu, tetapi proses itu akan lebih kompleks. Perhatikan struktur balok menerus pada Gambar L–10–2. Dua tumpuan harus dihilangkan terlebih dulu untuk menjadikan struktur ini statis tertentu. Apabila tumpuan B dan C dihilangkan, maka struktur akan berdefleksi sebesar Δ_B dan Δ_C di masing-masing titik tersebut. Selanjutnya kita berikan beban satuan di B dan kita hitung lendutan di B yang kita sebut δ_{BB}. Beban di B ini juga menyebabkan titik C mengalami lendutan (defleksi) vertikal yang kita sebut δ_{BC}. Selanjutnya, kita memberikan beban satuan di C yang menyebabkan lendutan di C (kita sebut δ_{CC}) dan juga di B (kita sebut δ_{CB}). Kita perhatikan bahwa gaya reaksi R_C akan menyebabkan titik C bergerak ke atas sebesar $R_C\delta_{CC}$. Gaya R_C ini juga akan menyebabkan titik B bergerak ke atas sebesar $R_C\delta_{BC}$. Begitu pula dengan gaya reaksi di B, R_B menyebabkan titik B naik sebesar $R_B\delta_{BB}$ dan titik C naik sebesar $R_B\delta_{BC}$. Agar kedua titik tersebut memenuhi keadaan sesungguhnya, yaitu tidak mengalami defleksi (keadaan sesungguhnya adalah tumpuan sendi), maka syarat keserasian yang harus dipenuhi oleh R_B dan R_C adalah:



(a) Balok menerus yang dibebani terbagi rata

(b) Defleksi struktur apabila dua tumpuan tengah dihilangkan

(c) Defleksi akibat beban satuan pada B

(d) Defleksi akibat beban satuan pada C

(e) Reaksi akhir

(f) Diagram momen

Gambar L-10-2 Metode defleksi untuk analisis struktur

$$\Delta_B + R_B\delta_{BB} + R_C\delta_{CB} = 0$$
$$\Delta_C + R_C\delta_{CC} + R_B\delta_{BC} = 0$$

Persamaan ini dapat dipecahkan secara simultan apabila parameter lain telah diketahui (beban berikut kekakuan strukturnya)'

Proses ini dapat diteruskan untuk struktur yang mempunyai tumpuan lebih banyak lagi. Akan tetapi, jelas bahwa persamaan yang harus dipecahkan untuk itu menjadi lebih banyak. Hal ini tentu saja menjadi tidak sederhana untuk dikerjakan dengan perhitungan tangan sehingga perlu ada alternatif lain, misalnya solusi dengan menggunakan komputer.

Metode analisis yang telah dibahas di atas hanyalah merupakan salah satu dari berbagai metode analisis struktural yang ada. Banyak metode struktural lain yang juga didasarkan atas metode defleksi yang diuraikan di atas. Selain itu, banyak pula metode yang didasarkan atas pendekatan yang sangat berbeda dengan metode defleksi. Beberapa di antaranya berhubungan dengan kerja internal atau bentuk energi lainnya. Metode lain yang banyak digunakan misalnya teorema tiga momen. Teorema Castigliano, analogi kolom, metode *slope-deflection* (lendutan kemiringan), juga metode distribusi momen merupakan contoh-contoh metode analisis struktur yang banyak digunakan. Dua yang disebut terakhir ini paling banyak digunakan sebelum era komputer. Hingga kini kedua-duanya masih dianggap cukup baik untuk digunakan.

Kita tinjau kembali contoh balok menerus di atas dua tumpuan yang telah dibahas pada Lampiran 10. Analisis struktur untuk contoh itu dapat diselesaikan dengan berbagai cara, termasuk juga menggunakan komputer. Pada pendekatan dengan metode defleksi telah kita ketahui bahwa semakin banyak redundan, akan semakin banyak pula persamaan yang harus dipecahkan, yang berarti semakin rumit pula perhitungannya apabila dikerjakan dengan tangan. Oleh karena itu, banyak metode lain yang dikembangkan agar dapat menghindari proses yang semakin rumit untuk struktur yang semakin tinggi derajat statis tak tentunya. Salah satu dari metode yang dimaksud adalah metode distribusi momen yang akan diuraikan berikut ini.

Distribusi momen sering pula disebut *pendekatan berturut-turut (successive approximation)* karena metode ini melibatkan proses iterasi. Metode ini didasarkan atas studi mengenai momen dan rotasi yang diakibatkan oleh beban di tumpuan dan titik-titik hubung, dan hubungan antara momen dan rotasi pada berbagai lokasi. Iterasi yang dilakukan pada metode ini didasarkan atas prosedur menjepit titik hubung, menghitung momen-momen yang terjadi untuk kondisi seolah-olah elemen-elemen strukturnya berujung jepit, melepaskan titik hubung yang tadi dijepit (sehingga dapat terjadi rotasi), dan mempelajari transfer momen dan rotasi ke titik hubung lainnya. Metode ini merupakan cara yang sangat ampuh dalam menganalisis struktur, dan dapat pula digunakan pada struktur kompleks yang mempunyai banyak redundan. Hasil metode ini dapat cukup akurat, bergantung pada banyaknya iterasi yang dilakukan. Pembaca dianjurkan mempelajari lebih lanjut metode ini pada berbagai referensi lain.

Dengan adanya komputer, banyak metode analisis struktur yang sudah mulai ditinggalkan orang, termasuk juga metode distribusi momen. Ada berbagai metode lain untuk analisis struktur yang memang berorientasi kepada penggunaan komputer. Pada umumnya, metode-metode tersebut dapat dikelompokkan ke dalam dua kelompok besar, masing-masing ialah *metode kekakuan* yang menggunakan peralihan sebagai *anu,* dan *metode fleksibilitas* yang menggunakan redundan sebagai *anu.* Semua data dari struktur dan beban disimpan pada komputer dalam bentuk matriks. Dengan teknik ini kita dapat melakukan analisis pada struktur dengan derajat statis tak tentu yang sangat besar. Akan tetapi, perlu diingat bahwa pengguna metode ini harus benar-benar memahami teknik-teknik analitis yang mendasari metode analisis struktur tersebut.

LAMPIRAN 12: BEBAN TEKUK KRITIS PADA ELEMEN STRUKTUR TEKAN

Pada bagian ini kita akan meninjau secara sepintas beban tekuk untuk kolom yang kedua ujungnya berupa sendi. Beban tekuk kritis didefinisikan sebagai gaya aksial yang cukup untuk menahan batang dengan konfigurasi sedikit berdeformasi. Dalam keadaan dibebani P, kolom tersebut akan berdefleksi menjadi bentuk melengkung. Defleksi ini kita sebut y untuk titik yang terletak sejauh x dari salah satu ujung.

Kondisi yang diperlukan adalah bahwa salah satu ujung kolom tersebut dapat bergerak secara aksial terhadap ujung lainnya agar defleksi lateral di titik-titik lainnya dapat terjadi. Persamaan diferensial kurva defleksi adalah yang telah kita peroleh pada Lampiran 7:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M \tag{1}$$

Momen lentur pada ekspresi di atas di suatu titik hanyalah momen yang diakibatkan oleh gaya P dikalikan dengan defleksi y di titik itu. Dengan demikian, momen lentur tersebut adalah $M = -Py$. Jadi:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = -Py \tag{2}$$

Apabila kita menuliskan

$$\frac{P}{EI} = k^2 \tag{3}$$

maka

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = 0 \tag{4}$$

Persamaan diferensial ini dapat dengan mudah dipecahkan dengan menggunakan berbagai buku standar mengenai persamaan diferensial. Solusinya relatif sederhana. Kita hanya perlu mencari suatu fungsi yang apabila diturunkan dua kali dan ditambahkan dengan fungsi itu sendiri (dikalikan dengan konstanta) akan menghasilkan nilai nol. Jelaslah bahwa sin kx maupun cos kx memenuhi hal ini. Kedua suku ini dapat dikombinasikan untuk memenuhi persamaan diferensial di atas. Jadi:

$$y = C\sin kx + D\cos kx \tag{5}$$

Selanjutnya kita akan mencari konstanta C dan D. Di ujung elemen struktur tersebut, $y = 0$ untuk $x = 0$. Kita substitusikan nilai ini ke dalam Persaman (5) sehingga kita peroleh

$$0 = 0 + D \quad \text{atau} \quad D = 0 \tag{6}$$

Di ujung lainnya, $y = 0$ untuk $x = L$. Kita substitusikan nilai ini ke dalam ekspresi di atas sehingga:

$$0 = C\sin kL \tag{7}$$

Untuk ini salah satu kondisi di antara $C = 0$ atau sin kL dapat memenuhi. Akan tetapi, apabila $C = 0$, berarti $y = 0$ di sepanjang elemen struktur, yang artinya kita memperoleh solusi trivial yang tidak kita kehendaki. Karena itulah kita menggunakan:

$$\sin kL = 0 \tag{8}$$

Agar hal ini terpenuhi, haruslah:

$$kL = n\pi \text{ radians} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \tag{9}$$

Dengan memasukkan $k^2 = P/EI$ ke dalam Persamaan (9), kita peroleh:

$$\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)L = n\pi \quad \text{atau} \quad P = \frac{n^2\pi^2EI}{L^2} \tag{10}$$

Nilai terkecil untuk P akan terjadi apabila $n = 1$. Jadi, kita peroleh *ragam pertama tekuk* (yang kita sebut beban kritis):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2EI}{L^2} \tag{11}$$

Ini disebut *beban tekuk Euler* untuk kolom berujung sendi. Bentuk defleksi pada saat beban ini adalah:

$$y = C\sin\sqrt{\frac{P}{EI}}x \tag{12}$$

atau

$$y = C\sin\frac{\pi x}{L} \tag{13}$$

Jadi, bentuk defleksinya adalah kurva sinus.

Untuk kolom dengan kondisi ujung yang lain (ujung jepit dan sebagainya), beban tekuk dapat dicari dengan cara serupa. Yang berbeda adalah ekspresi momen serta kondisi batas yang digunakan.

S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	Profil	S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	Profil	S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	Profil
16.882	1030	W 36×280	1.868	114	W 24× 55	395	24,1	C 12× 25
13.718	837	W 36×230	1.836	112	W 14× 74	341	20,8	W 8× 24
10.998	671	W 33×200	1.612	98,4	W 18× 55	339	20,7	C 10× 30
7.343	448	W 33×141	1.598	97,5	W 12× 72	288	17,6	W 12×16,5
5.392	329	W 30×116	1.337	81,6	W 21× 44	279	17,0	W 8× 20
4.425	270	W 30× 99	1.324	80,8	W 16× 50	274	16,7	W 6× 25
4.376	267	W 27×102	1.121	68,4	W 18× 40	243	14,8	W 12× 14
3.622	221	W 24× 94	1.100	67,1	W 10× 60	231	14,1	W 8× 17
3.475	212	W 27× 84	949	57,9	W 18× 35	226	13,8	W 10× 15
3.311	202	W 18×105	926	56,5	W 16× 36	193	11,8	W 8× 15
2.885	176	W 24× 76	774	47,2	W 16× 31	185	11,3	C 9× 15
2.885	176	W 14×111	762	46,5	C 15× 40	172	10,5	W 10× 11,5
2.295	140	W 21× 68	575	35,1	W 14× 26	167	10,2	W 6× 16
2.262	138	W 14× 87	575	35,0	W 10× 33	149	9,09	C 8× 13,75
2.147	131	W 14× 84	474	28,9	W 14× 22	133	8,14	C 8× 11,5
2.131	130	W 24× 61	449	27,4	W 8× 31	128	7,80	W 8× 10
2.114	129	W 18× 70	442	27,0	C 12× 30	127	7,78	C 7× 14,75
2.098	128	W 16× 78	415	25,3	W 12× 22	100	6,08	C 7× 9,8
			398	24,3	W 8× 28	95	5,80	C 6× 13

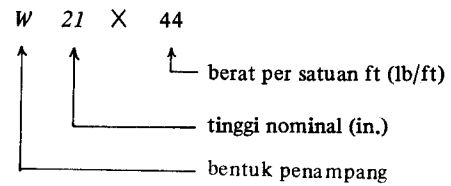
LAMPIRAN 13: TABEL MODULUS PENAMPANG (S_X) UNTUK BEBERAPA BENTUK YANG DIGUNAKAN SEBAGAI BALOK*

S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	*Shape*	S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	*Shape*	S_x $mm^3 \times 10^3$	S_x $in.^3$	*Shape*
16.882	1030	W 36×280	1.868	114	W 24× 55	395	24,1	C 12× 25
13.718	837	W 36×230	1.836	112	W 14× 74	341	20,8	W 8× 24
10.998	671	W 33×200	1.612	98,4	W 18× 55	339	20,7	C 10× 30
7.343	448	W 33×141	1.598	97,5	W 12× 72	288	17,6	W 12×16.5
5.392	329	W 30×116	1.337	81,6	W 21× 44	279	17,0	W 8× 20
4.425	270	W 30× 99	1.324	80,8	W 16× 50	274	16,7	W 6× 25
4.376	267	W 27×102	1.121	68,4	W 18× 40	243	14,8	W 12× 14
3.622	221	W 24× 94	1.100	67,1	W 10× 60	231	14,1	W 8× 17
3.475	212	W 27× 84	949	57,9	W 18× 35	226	13,8	W 10× 15
3.311	202	W 18×105	926	56,5	W 16× 36	193	11,8	W 8× 15
2.885	176	W 24× 76	774	47,2	W 16× 31	185	11,3	C 9× 15
2.885	176	W 14×111	762	46,5	C 15× 40	172	10,5	W 10× 11.5
2.295	140	W 21× 68	575	35,1	W 14× 26	167	10,2	W 6× 16
2.262	138	W 14× 87	575	35,0	W 10× 33	149	9,09	C 8× 13.75
2.147	131	W 14× 84	474	28,9	W 14× 22	133	8,14	C 8× 11.5
2.131	130	W 24× 61	449	27,4	W 8× 31	128	7,80	W 8× 10
2.114	129	W 18× 70	442	27,0	C 12× 30	127	7,78	C 7× 14.75
2.098	128	W 16× 78	415	25,3	W 12× 22	100	6,08	C 7× 9.8
			398	24,3	W 8× 28	95	5,80	C 6× 13

* Penampang balok pada tabel ini disusun menurut S_X yang mengecil untuk setiap kelompok. Yang paling atas pada setiap kelompok adalah yang paling ringan, tetapi mempunyai modulus penampang terbesar di antara kelompok tersebut. Jadi, penampang demikianlah yang efisien untuk digunakan.

W adalah bentuk sayap lebar.
C adalah bentuk kanal.

Arti notasi:



INDEK

A

Agregasi:
- contoh, 10, 17
- definisi, 18
- struktur bersel (selular), 23

Amiens, 44
Analisis rangka bertingkat banyak, 375
Angka perbandingan Poisson, 79
Aturan sepertiga tengah, 316

B

Baja:
- gedung rangka berpengekang (braced), 517, 526
- karakteristik material, 79, 82 – 85
- struktur, 557 – 63
- tegangan izin lentur, 289
- tegangan izin tarik, 63

Balok berflens lebar, 288, 517 – 18, 559, 562, 602
Balok berujung jepit, 342
Balok boks (kotak), 547, 551
Balok dan *slab* dua arah, 393 – 94, 516, 517, 425 – 26, 554, 555
Balok menerus, 337 – 58
- berujung jepit, 342
- beton bertulang, 358
- distribusi gaya, 339
- efek beban sebagian, 348
- efek kekakuan elemen, 345
- efek turunnya tumpuan, 348
- karakteristik dasar, 240
- kekakuan, 339
- kondisi beban kritis, 351
- mengontrol distribusi momen, 358
- metode pendekatan pada analisis, 341 – 351
- momen desain, 353 – 54
- panjang efektif, 339
- penentuan bentuk, 354
- statis tak tentu, 338
- titik hubung konstruksi, 356

Balok, 238 – 306
- baja, 557 – 58, 562
- balok kotak (boks), 547, 551
- bentuk, 288, 295 – 300
- bentuk sayap lebar, 288, 517 – 18, 557 – 58, 562, 602
- beton bertulang, 280 – 82, 552 – 53, 537
- defleksi, 271 – 74, 284
- desain, 283 – 304
- distribusi gaya pada, 247 – 48
- elastik linear, 242
- *girder* plat, 510, 561
- karakteristik dasar, 11
- kayu, 547 – 48, 551

kelengkungan, 242
kondisi batas, 300
lokasi tumpuan, 300, 503
mekanisme memikul beban, 244 – 47
menerus, 240
modulus penampang, 283, 288, 291, 295 – 97, 60
momen inersia, 241, 305, 576 – 83
pascatarik, 301 – 305
penampang tak simetris, 256
perilaku plastis, 276 – 80
prategang, 301 – 305
prinsip-prinsip umum, 239 – 248
pusat berat, 242, 251, 574 – 76, 584
pusat geser, 267 – 68
sumbu netral, 242, 249, 583
tegangan gabungan, 269 – 70
tegangan geser, 245 – 46, 259 – 65, 585 – 87
tegangan lentur, 247, 583 – 85
tegangan tumpu, 265 – 66
tegangan utama, 282
tekuk lateral, 290 – 92
teori umum mengenai lentur, 254 – 55, 583 – 85
tinggi, efek terhadap tegangan, 252
tinggi, elemen beton bertulang, 558
tinggi, elemen baja, 562
tinggi, elemen kayu, 551
torsi, 266
Batang pengikat (tie-rods), 15, 34
Batas-batas bentang (lihat Panjang bentang)
Baut, 570 – 71
Beban bergerak, 97
Beban garis, 97 – 101
Beban mati, 96 – 98, 121
Beban tekuk Euler, 309, 316, 600
Beban tekuk kritis, 309, 316
Beban vertikal:
efek terhadap pemilihan struktur, 509
hidup, 97 – 101
mati, 96 – 100, 121
Beban, 94 – 111
angin, 100 – 103
dinamis, 94, 103
gempa, 103 – 109
hidup, 97 – 101
kombinasi, 109 – 110
mati, 96 – 97
model, 112, 118 – 30
reduksi, 111
salju, 100 – 101
statis, 94 – 102
Besaran-besaran bentang, 420, 485 – 86
Beton bertulang:
balok, 280 – 82
balok menerus, 358

batas-batas ukuran bentang, 579
plat datar, 428, 504, 510, 552
pracetak, 556 – 57
prategang dan pascatarik, 301 – 304, 556 – 58
slab datar, 554
struktur, 552 – 58
Biaya, 94

C

Cangkang bola, 14 (*lihat juga* Struktur cangkang)
Cangkang putar, 14, 459
Cangkang silindris;
cangkang putar, 459
karakteristik umum, 14
ruang bawah tanah, 457
Cara pemutaran pojok, 493

D

da Vinci, Leonardo, 41, 238
Defleksi (lendutan):
metode integrasi rangkap, 588
pada balok, 271 – 75, 284
persamaan diferensial umum, 587
teorema luas momen (moment-area), 589 – 93
Deformasi:
defleksi, 271 – 74, 284, 588 – 93
pada elemen struktur tarik dan tekan, 86 – 88
Desain tahan gempa, 528 – 41
elemen nonstruktural, 540 – 1
karakteristik, 533 – 38
kekakuan, 538 – 41
tinjauan desain umum, 531 – 34
material, 539 – 40
periode alami getaran, 538
simetri, 531
Diafragma, 519, 537
Diagram benda bebas, 55
Diagram keseimbangan, 55
Diagram momen dan geser, 70 – 78
bentuk-bentuk diagram, 75
hubungan antara beban, geser, dan momen, 78
hubungan antara momen dan kurva defleksi struktur, 77
pembuatan diagram, 70
perjanjian tanda, 75
untuk balok ditumpu sederhana yang dibebani terbagi rata, 73 – 75
untuk balok ditumpu sederhana yang dibebani terpusat, 69 – 71
untuk struktur kantilever, 72
Diagram regangan geser, 80 – 81 (*lihat juga* Modulus elastisitas)
Dinamika, 41

Dinding geser:
definisi, 19
susunan, 517, 522
untuk menahan beban lateral, 516 – 17
untuk mencegah ketidakstabilan, 19, 20, 482, 516 – 20
Dinding penumpu beban:
karakteristik umum
masalah stabilitas, 482
pada rumah, 17, 26, 475
pada struktur satuan gelincir, 20, 495
pemutaran pojok, 493
Drop panels, 395 – 96, 428 – 29

E

Efek dinamis akibat angin, 103
Efek laju regangan, 85
Efek statis akibat angin, 100 – 102
Efek temperatur:
pada sifat mekanis material, 86
pada struktur, 117 – 8
Efek termal, 117
Efisiensi, 93
Elastis linear, 78 – 79, 242
Elemen beton pracetak, 556 – 58
Elemen pembentuk garis, 6
Elemen pembentuk ruang, 6
Elemen struktur diagonal (*lihat juga* Rangka batang):
rangka berpengekang, 517, 537
penggunaan untuk mencegah ketidakstabilan, 19, 20
Elemen struktur dua gaya, 52, 143
Elemen struktur tiga gaya, 52

F

Faktor keamanan, 63
Fatik, 86

G

Galilei, Galileo, 41, 238
Garis kerja, 41 – 42, 46
Gaudi, Antonio, 33
Gaya angin:
distribusi dan besar, 100 – 103
efek terhadap desain, 516 – 28
efek terhadap struktur kabel, 199 – 201, 225 – 7
Gaya horizontal (*lihat* Gaya lateral)
Gaya kabel, analisis, 212 – 21
Gaya lateral:
angin, 100 – 102 (*lihat juga* Beban)

efek pada desain, 516 – 28
gempa, 103, 109
pengaruh terhadap desain elemen dan hubungan, 519 – 24
Gaya melingkar, 454, 461 – 63
Gaya membujur, 454, 461
Gaya statis, 94 – 102
Gaya gempa, 103, 109, 528 – 9
Gaya-gaya:
besaran skalar, 41
besaran vektor, 41
definisi, 41
garis kerja, 41
gaya-gaya yang bekerja, 54 (*lihat juga* Beban)
gaya reaksi, 54
jajaran genjang gaya, 43
pendekatan secara grafis, 44
prinsip-prinsip dasar, 41 – 46
resultan, 43
sistem gaya eksternal, 54 – 59
uraian dan komposisi, 46
Gaya-gaya internal, 103, 104
Gedung bertingkat tinggi (*lihat* Konstruksi bertingkat banyak)
Geser;
distribusi, 70
fenomena dasar, 64 – 66
pada balok, 245
perjanjian tanda, 66 – 67
tegangan pada balok, 246, 259 – 265, 585 – 587
Geser dan momen:
fenomena dasar, 64 – 66
pada rangka batang, 159 – 63
Getaran atap, 103, 199 – 201, 225
Girder plat, 510, 561
Goyangan, 381 – 83
Grid bujursangkar, 487
Grid dan pola-pola, 472 – 506
agregasi satuan dasar, 473
bentuk gedung, 491 – 5
besaran-besaran bentang, 485 – 9
gedung satuan gelincir, 495
hubungan dengan ruang fungsional, 483 – 5
karakteristik pembentukan ruang, 504 – 6
kecocokan ketat, 483 – 4
kecocokan longgar, 483 – 4
manipulasi pola, 479 – 81
masalah stabilitas, 481 – 2
pemodelan struktur, 489
penyediaan ruang besar, 497 – 8
penyediaan sistem servis, 498 – 502
pertemuan beberapa *grid*, 489 – 91
pojok-pojok memutar, 493
pola bujursangkar, 487
pola segiempat, 486

pola umum, 475 – 79
ruang antara, 482
tak seragam, 496
Grid segiempat, 488
Grid struktural *(lihat Grid* dan pola-pola)
Gund Hall, 476

H

Hubungan:
baut 570 – 71
butt, 565 – 7
berubah bentuk (deformed), 567
hubungan dengan desain terhadap lateral, 522

khas, 116
lap, 565 – 7
las, 573
mengunci (interlocking), 565 – 7
model untuk, 113 – 9
paku keling, 570 – 72
permukaan, 568
titik, 568
titik hubung kaku, 5, 20, 113 – 4
titik hubung rol, 57, 116 – 7
titik hubung sendi, 57, 113 – 7
Hubungan momen-kelengkungan, 586 – 7
Hukum ketiga Newton, 54

J

Jalur beban, 118 – 9
Jari-jari girasi, 321, 328, 333
Jaring, 16, 435, 445
Jembatan Smithfield Street, 187
Jembatan Tacoma Narrows, 108
joist web terbuka, 170, 561
Joists, 170, 561

K

Kebakaran, 543
Kecocokan ketat, 484
Kecocokan longgar, 483
Kekakuan relatif, 377 – 400
Kekuatan material, 41
Kekuatan, 84
Kelengkungan, 242
Kemampuan layan (serviceability) 92
Kepala kolom, 428 – 9

keseimbangan:
elemen-elemen dua gaya, 52
elemen-elemen tiga gaya 52
konsep dasar, 41, 49 – 54
suatu benda tegar, 51
suatu partikel, 49
Klasifikasi struktur:
berdasarkan aksi pemikul beban dasar, 38
berdasarkan aksi pemikul beban dasar, 38
berdasarkan geometri, 6
berdasarkan kekakuan, 8
berdasarkan material, 10
Koefisien tekanan, 101
Kolom panjang, 309, 316 – 20
Kolom pendek, 309, 313 – 5
Kolom, 308 – 334
angka (perbandingan) kelangsingan, 321, 328
aturan sepertiga tengah, 316
beban eksentris, 314 – 6
beban tekuk Euler, 309, 316, 600
beban tekuk kritis, 316, 600
beban tekuk kritis, 316, 600
desain, 328 – 34
jari-jari girasi, 321, 328, 333
kolom panjang, 316 – 320
kolom pendek, 309, 313 – 5
kondisi ujung, 313, 322 – 7, 328
kondisi ujung tak sempurna, 326
panjang efektif, 325
penampang melintang, 333 – 4
penampang komposit, 316
pengekang (bracing), 313, 328, 329 – 32
tekuk, 309
tegangan teguk kritis, 321
ukuran, 334
Kondisi pembebanan kritis, 351
Kondisi pembebanan sebagian 348
Kondisi tumpuan:
diidealisasi, 55 – 56
jepit, 55
kabel, 55
rol, 55
sendi, 55
Kondisi ujung (*lihat juga* Hubungan):
pada pelengkung, 231 – 4
pada balok, 300, 342
pada kolom, 313, 324 – 7
Konsentrasi (pemusatan) tegangan, 86
Konstruksi bertingkat banyak:
analisis, 375
diafragma, 519
efek torsional, 521
jenis-jenis, 523 – 528
kontrol defleksi, 527
kontrol gerakan, 527

Konstruksi komposit, 561 – 4
Konstruksi, kriteria analisis dan desain, 93
Kubah Geodesik, 453
Kubah Schwedler, 452
Kubah, 14 (*lihat juga* Struktur cangkang)
Kurva *catenary*, 16, 204

L

Las, 533
Lentur:
- fenomena dasar, 11, 22
- tegangan pada balok, 245, 249 – 59, 583 – 5

Limit proporsional, 79
Luas kontribusi, 118 – 20

M

Material daktil, 83 – 85
Material getas (brittle material), 83 – 85
Mekanika, prinsip-prinsip, 41
Mekanisme runtuh, 19, 20
Membran, 16, 431, 448
Metode defleksi, analisis struktur statis tak tentu, 597 – 8
Metode integrasi rangkap, 593 – 5
Metode kantilever, 375
Metode potongan, 155 – 63
Metode titik hubung, 144 – 52
Model-model beban, 118 – 29
Modulus elastisitas (*E*):
- baja, kayu, beton, aluminium, 79
- definisi, 79
- pada ekspresi perpanjangan, 86 – 87
- pengaruh pada defleksi balok, 271 – 2, 284, 588 – 93
- pengaruh pada tekuk kolom, 309, 316, 600

Modulus penampang, 283, 288, 292, 295 – 7, 602
Momen:
- akibat banyak gaya, 47
- beban terdistribusi, 47
- gaya terhadap garis, 47
- komponen, 48
- kopel, 47
- momen eksternal, 54
- momen internal, 54
- perjanjian tanda untuk perhitungan keseimbangan, 52
- prinsip-prinsip dasar, 46 – 48
- tahanan, 163, 213 – 16, 244, 251, 398, 402 – 405, 442, 464, 511, 583

Momen eksternal (*lihat juga* Momen lentur);
- pada balok, 244 – 5, 251, 583
- pada kabel, 213 – 216
- pada rangka batang, 159
- pada sembarang struktur, 65

Momen inersia:
- definisi, 576
- hubungan dengan defleksi balok, 271 – 4
- hubungan dengan modulus penampang, 283
- hubungan dengan tegangan lentur, 249, 266
- luas negatif, 582
- pada balok, 240, 249
- penampang geometris
- penampang tak simetris, 246
- penentuan besarnya, 576,– 83
- segiempat, 579
- teorema sumbu sejajar, 580 – 81

Momen inersia, 271 – 5, 283, 600 – 604
Momen lentur (*lihat juga* Momen eksternal):
- distribusi, 70
- fenomena dasar, 64 – 66
- pada balok, 245
- perjanjian tanda, 67 – 68

Momen negatif, 68, 76 – 77
Momen positif, 68, 76 – 77
Momen tahanan:
- pada balok, 244 – 45, 251, 583
- pada cangkang, 163
- pada kabel, 213 – 216
- pada membran, 442
- pada plat, 333, 402, 82
- pada rangka batang, 163
- pada semua struktur, 511

Momen tahanan internal (*lihat* Momen tahanan)
Momen yang bekerja (*lihat* Momen eksternal)
Morfologi, 6, 9, 38, 474

N

Newton, Sir Isaac, 41
Newton, sistem SI, 573

P

Paku keling, 570 – 71
Panel kulit bertegangan, 547, 551
Panel pelengkung, 550
Panjang bentang:
- efek terhadap pemilihan struktur, 510 – 16
- hubungan antara bentang dan struktur, 512 – 13
- kepekaan momen, 510
- khas, 486, 513, 553, 557, 562
- sistem dua arah, 514
- sistem satu arah, 514
- struktur baja, 562
- struktur beton bertulang, 579
- struktur berbentang menengah, 514
- struktur berbentang panjang, 512 – 3

struktur berbentang pendek, 514
struktur kayu, 551
Panjang efektif:
pada balok menerus, 339
pada kolom, 356
Pascatarik, 301 – 304
Pascal, 573
Pedoman sederhana, 545 – 6, 550 – 51, 558, 562
Pelengkung:
analisis, 203, 221
analogi rangka batang, 185 – 6
baja, 561
desain, 227 – 236
dua sendi, 231 – 5
efek variasi beban, 185, 196, 227 – 32
kaku, 112, 231 – 5
kayu, 550 – 51
karakteristik dasar, 12, 193 (*lihat* juga *Struktur* funicular)
kondisi ujung, 232 – 4
perilaku laterla, 235 – 6
perkembangan riwayat, 196 – 7
prinsip-prinsip umum, 197 – 8
tinggi, 222
tiga sendi, 203 – 12, 228 – 234
Pelengkung berujung jepit, (*lihat* Pelengkung kaku)
Pelengkung dua sendi, 231 – 3
Pelengkung kaku, 197, 231 – 3
Pelengkung tiga sendi, 203 – 12, 228 – 233
Pemanasan, pengondisian, pengedaran udara, 498 – 502
Pemodelan struktur, 113 – 8
berujung jepit, 114
pengisolasian elemen struktural, 55, 114, 125
titik hubung kaku, 113 – 4
titik hubung rol, 113, 117
titik hubung sendi, 113 – 7
Penampang T, 452
Penampang tak prismatis (haunches), 542
Penentuan pola, 489 – 93
Pengekang kolom, 328, 329 – 32
Peraturan tentang gedung, 100, 109
Perilaku plastis pada balok, 276 – 9
Periode alami getaran, 96 – 97, 500, 105 – 7, 538
Perjanjian tanda:
untuk gaya geser dan momen pada balok, 67 – 68
untuk rangka, 372
untuk rekreasi, 51 – 52
Plat datar:
beban terdistribusi merata, 510
geser, 427
karakteristik dasar, 13, 552, 558
karaksteristik pembentuk ruang, 504
kosntruksi, 552
Plat lipat, 513 – 9
aksi balok longitudinal, 414
aksi balok transversal, 414
balok batas, 415
kayu, 550 – 51
plat pengaku, 415 – 6
Pola, 472 – 506
Potongan, metode, 152 – 59
Prategang, 301 – 3
Prinsip kebijaksanaan struktural, 542
Pusat berat:
balok segiempat, 251
definisi, 574
lokasi umum pada balok, 242, 580
penentuan lokasi, 574 – 576
Pusat geser, 267 – 8
Pusat Kesehatan Mental dan Medis Woodhull, 502
Pusat sains, 478, 501

R

Rangka (frame), 362 – 91
beban horizontal, 365 – 6
beban vertikal, 363 – 4
bertingkat banyak, 375
goyangan, 381 – 2
karakteristik dasar, 13
kekakuan relatif elemen, 377 – 80
metode pendekatan analisis, 367 – 84
momen desain, 384
penentuan bentuk, 385
perjanjian tanda, 372
rangka satu bentang, 367
titik belok, 367 – 8, 372
turunnya tumpuan, 381
Rangka batang, 134 – 92
analisis dengan metode potongan, 152 – 9
analisis dengan metode titik hubung, 144 – 52
bagian meminggul (kantilever), 188
berbentuk lensa, 187
desain, 165 – 90
desain batang, 165 – 74
funicular, 182 – 187
gaya batang, 143 – 64
geser dan momen, 159 – 61
karakteristik umum, 13
kekakuan titik hubung, 190
lenticular, 186 – 7
mengontrol distribusi gaya, 178 – 9
penggunaan kabel, 170 – 174
perkembangan riwayat, 134
pola segitiga, 177 – 9
prinsip-prinsip umum, 135 – 9
stabilitas, 140 – 3
statis tak tentu, 152 – 65

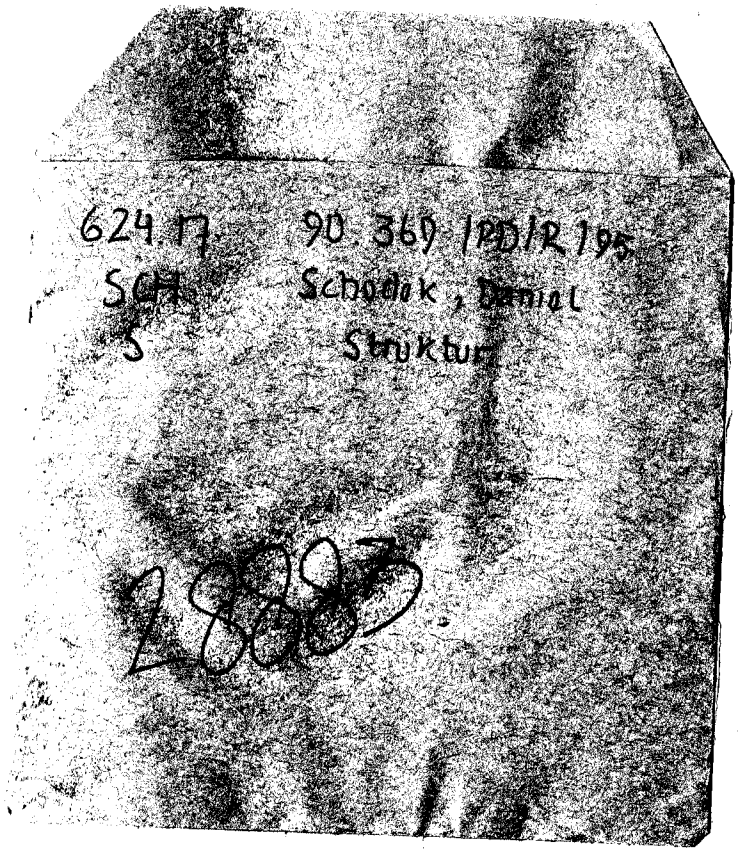
tekuk lateral, 178 – 82
tiga dimensi, 165 – 6, 182
tinggi, 165 – 90
Rangka berpengekang (braced frame), 517, 526
Rangka kaku (*lihat* Rangka)
Rangka ruang, 393, 410
Rangkak, 86, 302
Reaksi:
definisi, 54
pada balok khas, 121 – 129
perhitungan, 58 – 59, 121 – 29
Regangan:
definisi, 78
pada elemen struktur tarik, 79, 86 – 88
Resonansi, 106, 538
Ruang antara, 502
Rumah:
dinding geser, 516
garis-garis pemikul beban, 440 – 41, 475 – 6
perilaku selular, 17 – 18, 472

S

Sag kabel, 222 – 3, 225
Satuan SI, 573 – 4
Satuan struktural utama:
contoh, 7, 17
definisi, 16
satuan volumetrik tunggal, 7, 26
Sifat mekanis material, 78 – 86
deformasi lateral, 79
efek laju regangan, 85
efek temperatur, 85
fatik, 86
kekuatan, 83
konsentrasi (pemusatan) tegangan, retak, dan cacat, 86
limit proporsional, 79
modulus elastisitas, 79
perilaku daktil, 84 – 5
perilaku getas (brittle), 84 – 5
rangkak, 86
Sistem balok dan kolom (*lihat juga* Rangka)
beban horizontal, 363
beban vertikal, 148
karakteristik dasar, 11
pada gedung,
susunan secara hierarki, 240
Sistem dua arah:
balok dan *slab*, 425, 103
batas-batas bentang, 513
beton bertulang, 422 – 30
karaksteristik dasar, 23, 25
plat, 419 – 22, 428, 504, 510, 552, 558
slab wafel, 413, 556, 558

Sistem layan, 499 – 502
Sistem satu arah:
daerah ukuran bentang, 513
joists pam, 552, 558
karakteristik dasar, 23, 24
plat, 413 – 19
Sistem yang ekuivalen secara statis, 48
Sistem-sistem struktural, 545 – 63
Slab ber-*rib*, 413
Slab datar, 555
Slab wafel, 413, 556, 558
St. Quen, 91
Stabilitas:
fenomena dasar, 18, 19
pada rangka batang, 140 – 43
pada unit volumetrik khas, 19 – 20
Statika, 38
Struktur berbentang menengah, 514
Struktur berbentang panjang, 502 – 13
Struktur berbentang pendek, 514
Struktur bertekanan (*lihat* Struktur pneumatik)
Struktur cangkang, 449 – 469
aksi membran, 453
beban terpusat, 463
kubah geodesik, 453
gaya-gaya sebidang, 450, 454
gaya membujur, 454, 461
hiperbolis-paraboloid, 459 – 60
kondisi tumpuan, 463 – 8
kubah bata, 452
gaya melingkar, 454, 461 – 3
perbandingan dengan pelengkung, 474
putar, 459
susunan batang, 452
tebal, 451
tekuk, 468
terowongan, 457
Struktur fleksibel, 8, 15 (*lihat juga* Struktur kabel)
Struktur *funicular:*
Colonia Guell Chapel, model, *funicular*, 33
karakteristik dasar, 29
keluarga bentuk-bentuk *funicular*, 31
kubah St. Peter, pembuatan garis *thrust*, 30
pelengkung dan *gables*, 215 – 237
rangka batang, 182 – 87
struktur *funicular* tiga dimensi, 32
transformasi yang diturunkan dari bentuk dasar, 34 – 35
Struktur *grid (lihat* Struktur plat dan grid)
Struktur kabel:
desain 222 – 7
efek angin, 199 – 201, 225 – 7
elemen-elemen yang menumpunya, 223 – 7
gantung, 199
gaya-gaya pada, 212 – 221

getaran karena angin, 103, 199 – 201, 225 – 7
karakteristik umum, 15, 193 – 95 (*lihat juga* Struktur *funicular*)
kurva *catenary*, 198
panjang, 222
perkembangan riwayat, 194 – 5
resonansi, 108, 225
sag, 222 – 3, 225
stayed, 199
struktur, 562 – 3
Struktur kaku, 9, 11
Struktur kayu, 546 – 51
Struktur *lamella*, 453, 548 – 51
Struktur *lenticular*, 117, 186 – 7
Struktur membran, 431, 448
dikembangkan oleh udara, 433, 442 – 5
ditumpu oleh udara, 433, 436 – 7
gaya prategang, 436, 446
jaring-jaring, 535, 445
kelengkungan, 445
kubang, 444 – 5
pneumatik, 533 – 5, 436 – 45
profil, 440
tekanan udara internal, 433 – 4, 437, 438
tenda, 435, 445
Struktur pipa, 524 – 537
Struktur plat dan *grid*, 393 – 430
analisis *grid*, 394 – 6, 399 – 401
analisis plat, 397 – 9, 401 – 12
beton bertulang, 422 – 30
daerah ukuran bentang, 421, 424
garis isostatis, 429
geser, 426
karakteristik dasar, 14
kepala kolom, 428 – 9
perilaku plastis, 422
plat ber-*rib*
plat lipat, 413 – 19
proporsi bentang, 420
sistem dua arah
sistem satu arah, 413 – 19
slab dan balok dua arah, 425 – 6, 554, 555
slab wafel, 413, 556, 558
Struktur pneumatik, 433 – 435, 436 – 45 (*lihat juga* Struktur membran)
Struktur *post-and-beam* (*lihat juga* Sistem balok dan kolom)
beban horizontal, 4, 365
beban vertikal, 4, 11, 363
contoh, 11, 17, 26
Struktur *slab* (*lihat* Struktur plat dan *grid*).
Struktur statis tak tentu:
analisis, metode defleksi, 595 – 9
analisis, metode integrasi rangkap, 588 – 9
analisis, pendekatan, 341 – 51, 367 – 84
balok, 337 – 58
rangka, 362 – 91



624.17 90.369 /PD/R/95
SCH Schodek, Daniel
S Struktur
28883